

Fundação Getúlio Vargas
Escola de Matemática Aplicada

Luciana Pereira da Silva
William de Jesus Kremes

Desenvolvimento de um sistema de predição da
dispersão de agentes NBQR, baseado no manual
ATP-45 da OTAN

Luciana Pereira da Silva
William de Jesus Kremes

**Desenvolvimento de um sistema de predição da
dispersão de agentes NBQR, baseado no manual
ATP-45 da OTAN**

Trabalho de conclusão de curso submetido à
Escola de Matemática Aplicada como requisito
parcial de avaliação no Curso de Especialização
em Inteligência Artificial para Aplicações Mili-
tares.

Orientador: Prof. Dr. Rafael de Pinho André

Rio de Janeiro
2025

Resumo

O presente trabalho desenvolveu um sistema de análise preditiva para dispersão de agentes químicos, baseado nos princípios do ATP-45 da OTAN e adaptado para cenários urbanos. O sistema integra modelagem matemática tradicional e técnicas de ciência de dados, permitindo a simulação e visualização geoespacial das áreas de risco conforme variáveis atmosféricas e operacionais. Foram implementados módulos específicos para agentes persistentes e não persistentes, considerando fatores como estabilidade do ar, velocidade e direção do vento, e meio de lançamento (detonação aérea, detonação por superfície e espargimento). Os resultados evidenciaram que a velocidade do vento e a estabilidade atmosférica exercem influência direta sobre a extensão e forma da área contaminada, destacando a importância da análise meteorológica na resposta a incidentes NBQR. Além disso, a plataforma interativa desenvolvida em ambiente web (<https://nbqr.onrender.com/>) permite a inserção de parâmetros pelo usuário e a geração automática das áreas de risco, servindo como ferramenta de apoio à decisão em operações de defesa e segurança civil. O trabalho também indica o potencial de integração futura com redes de sensores e modelos de inteligência artificial para aprimorar a precisão e a rapidez das previsões.

Palavras-chave: Defesa NBQR; ATP-45; Dispersão de agentes químicos; Modelagem preditiva; Inteligência artificial; Visualização geoespacial.

Abstract

This study developed a predictive analysis system for the dispersion of chemical agents, based on NATO's ATP-45 principles and adapted to urban scenarios. The system integrates traditional mathematical modeling and data science techniques to simulate and visualize geospatial risk areas according to meteorological and operational variables. Specific modules were implemented for persistent and non-persistent agents, considering factors such as atmospheric stability, wind speed and direction, and release mode (air detonation, surface detonation, and spray). The results showed that wind speed and atmospheric stability have a direct impact on the shape and extent of the contaminated area, emphasizing the importance of meteorological analysis in NBQR incident response. Furthermore, the interactive web-based platform (<https://nbqr.onrender.com/>) allows users to input parameters and automatically generate risk areas, serving as a decision-support tool for defense and civil protection operations. The study also highlights the potential for future integration with sensor networks and artificial intelligence models to improve prediction accuracy and responsiveness.

Keywords: CBRN Defense; ATP-45; Chemical agent dispersion; Predictive modeling; Artificial intelligence; Geospatial visualization.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Contextualização	7
1.2	Justificativa	9
1.3	Objetivos	9
1.3.1	Objetivo Geral	9
1.3.2	Objetivos Específicos	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1	ATP-45	11
2.2	Influência de Fatores Meteorológicos e Ambientais na Dispersão de Agentes NBQR	12
2.2.1	Fatores Meteorológicos	12
2.2.2	Fatores Topográficos e Ambientais	13
2.3	Modelos Matemáticos e Computacionais de Dispersão Atmosférica	14
2.4	Trabalhos Anteriores e Soluções Similares	15
3	METODOLOGIA	18
3.1	Predição Simplificada para Agentes Químicos	18
3.2	Predição Detalhada para Agentes Químicos	18
3.3	Implementação Prática	19
3.3.1	Interface de Entrada	19
3.3.2	Classificação da Predição	19
3.3.3	Geração de Área de Risco	19
3.3.4	Visualização Geográfica	20
4	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	21
4.1	Módulo de Definição dos Agentes Químicos	22
4.2	Módulo de Conversão Geográfica	23
4.2.1	Funcionamento	24
4.3	Módulo de Geração e Visualização da Área de Risco	24
4.3.1	Parâmetros de Entrada	24
4.3.2	Fluxo do Algoritmo	25
4.3.3	Observações	29
4.4	Módulo de Geração e Visualização da Área de Risco para Espargimento	29
4.4.1	Parâmetros de Entrada	29
4.4.2	Fluxo do Algoritmo	30
4.5	Módulo de Predições	35
4.5.1	Funções Principais	35

4.5.2	Script Principal	40
5	RESULTADOS	43
5.1	Predição Simplificada	43
5.2	Predição para Agentes Não Persistentes	45
5.3	Predição para Agentes Persistentes	47
5.4	Discussão dos Resultados	51
6	CONCLUSÃO	52
7	REFERÊNCIAS	54

Lista de Figuras

1	Predição simplificada e velocidade do vento ≤ 10 km/h	44
2	Predição simplificada e velocidade do vento > 10 km/h	44
3	Agente não persistente e velocidade do vento ≤ 10 km/h	45
4	Agente não persistente, velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar instável	46
5	Agente não persistente, velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar neutra	46
6	Agente não persistente, velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar estável	47
7	Agente persistente, detonação aérea e velocidade do vento ≤ 10 km/h . . .	48
8	Agente persistente, detonação aérea e velocidade do vento > 10 km/h . . .	48
9	Agente persistente, detonação por superfície e velocidade do vento ≤ 10 km/h	49
10	Agente persistente, detonação por superfície e velocidade do vento > 10 km/h	50
11	Agente persistente, espargimento e velocidade do vento ≤ 10 km/h	50
12	Agente persistente, espargimento e velocidade do vento > 10 km/h	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Eventos catastróficos, como o uso deliberado de armas nucleares, acidentes em usinas nucleares ou a liberação acidental ou intencional de agentes biológicos, radiológicos e químicos (NBQR), representam uma das ameaças mais complexas e devastadoras da atualidade. Tais incidentes têm o potencial de causar não apenas devastação em larga escala e contaminação generalizada de ecossistemas, mas também de gerar um impacto socioeconômico profundo e duradouro, afetando a saúde pública, a infraestrutura vital e a estabilidade regional.

Nesse contexto, o gerenciamento de riscos associados a eventos envolvendo agentes NBQR representa um desafio crescente, exigindo respostas rápidas, baseadas em informações confiáveis e modelagens preditivas robustas, capazes de orientar decisões estratégicas em tempo real.

Esses eventos não afetam apenas a área diretamente impactada: vapores e aerossóis liberados durante o incidente, bem como a evaporação secundária de agentes persistentes, podem ser transportados pelo vento por longas distâncias, ameaçando tropas, instalações críticas e populações civis adjacentes (BRASIL, 2020). Além das implicações diretas à saúde e à segurança, os incidentes NBQR também geram profundos impactos sociais e econômicos — como o deslocamento de populações, a paralisação de atividades econômicas, a contaminação ambiental duradoura e o aumento da pressão sobre os sistemas de saúde pública e a infraestrutura.

De acordo com Akimova (2015), a Defesa NBQR refere-se ao conjunto de medidas e capacidades destinadas à prevenção, proteção e resposta a incidentes que envolvem agentes perigosos, sejam eles liberados de forma acidental ou intencional. Esses agentes são classificados, conforme Brasil (2020), da seguinte forma:

- *Agentes Químicos*: são substâncias tóxicas que, quando dispersas, podem causar morte, incapacitação temporária ou danos graves. Incluem agentes nervosos (ex.: Sarin, VX), agentes vesicantes (ex.: Gás Mostarda), agentes sanguíneos (ex.: Cianeto) e agentes sufocantes (ex.: Cloro, Fosgênio). A exposição pode ocorrer por inalação, contato com a pele ou ingestão.

- *Agentes Biológicos*: consistem em microrganismos (bactérias, vírus, fungos) ou toxinas produzidas por eles, utilizados para causar doenças em humanos, animais ou plantas (ex.: *Bacillus anthracis* (antraz), vírus da varíola). A dispersão pode ser intencional, por aerossóis, contaminação de alimentos ou água, e o período de incubação pode dificultar a identificação precoce do ataque.

- *Agentes Radiológicos*: envolvem a dispersão de materiais radioativos sem uma explosão nuclear, como no caso de um Dispositivo de Dispersão Radiológica (DDR), po-

pularmente conhecido como "bomba suja". O principal perigo é a exposição à radiação ionizante, que pode levar a doenças agudas da radiação, câncer e contaminação ambiental de longo prazo.

- *Agentes Nucleares*: referem-se a armas que utilizam reações nucleares (fissão ou fusão) para liberar uma enorme quantidade de energia, resultando em explosão, calor intenso, onda de choque e radiação ionizante. Embora menos prováveis, os incidentes nucleares (como o uso de armas nucleares ou acidentes em usinas nucleares) têm o potencial de causar devastação em larga escala e contaminação generalizada.

A previsão da dispersão desses agentes é um componente estratégico essencial na gestão de crises. Fatores meteorológicos como direção e velocidade do vento, temperatura, umidade, estabilidade atmosférica e precipitação afetam diretamente o comportamento das plumas contaminadas (MENDIL et al., 2022). Características do terreno — como relevo, cobertura vegetal, zonas urbanas e hidrografia — também influenciam o padrão de propagação: nuvens contaminadas tendem a se acumular em áreas rebaixadas, enquanto campos abertos favorecem dispersão mais rápida e ampla (BRASIL, 2020).

Dessa forma, a predição da dispersão de agentes NBQR torna-se uma ferramenta estratégica essencial. Trata-se de um processo técnico que busca delimitar áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas, com base em dados meteorológicos atualizados e informações táticas sobre o incidente (MENDIL et al., 2022). Essa previsão pode ser realizada por meio de processos manuais — utilizando gráficos e escalas — ou de sistemas computadorizados, capazes de gerar cenários em tempo real.

A qualidade da resposta depende diretamente da rapidez e precisão com que essas previsões são realizadas, influenciando decisões sobre evacuação de civis, mobilização de tropas, definição de rotas alternativas, alocação de recursos e reformulação de planos operacionais. Por isso, a previsão NBQR deve ser padronizada, meticulosa e continuamente atualizada, com apoio de ferramentas tecnológicas.

Nesse cenário, a interoperabilidade entre forças civis, militares e parceiros internacionais é um elemento-chave para garantir uma resposta eficaz e coordenada. A padronização de procedimentos e da comunicação é essencial para que as informações sejam compreendidas e acionadas de forma rápida por todos os envolvidos. O manual técnico ATP-45 da OTAN cumpre esse papel, ao definir protocolos de notificação, previsão e alerta de áreas de perigo NBQR, com base em variáveis meteorológicas e características do agente liberado (NATO, 2019). O documento fornece modelos gráficos e parâmetros para construção de zonas de risco, favorecendo a integração entre diferentes países e organizações.

No Brasil, a publicação CGCFN-10.3 — MANUAL DE DEFESA NUCLEAR, BIOLÓGICA, QUÍMICA E RADIOLÓGICA, adotada pelo Corpo de Fuzileiros Navais, incorpora metodologias do ATP-45, adaptando-as à realidade nacional. Ela reforça a necessidade da padronização das mensagens NBQR, da coleta sistemática de dados mete-

orológicos e da utilização de sistemas tecnológicos para melhorar a acurácia das previsões (BRASIL, 2020).

1.2 Justificativa

Tanto o ATP-45 quanto a CGCFN-10.3 destacam que, para que a previsão da dispersão de agentes NBQR atinja seus objetivos, é fundamental que o ataque seja identificado rapidamente — seja por tropas no terreno ou por sensores automáticos — e que os dados sejam transmitidos de forma ágil, padronizada e compreensível. Isso permite a emissão de mensagens NBQR claras e acionáveis, fundamentais para proteger vidas e mitigar os impactos do evento.

No entanto, a aplicação prática dos métodos gráficos e tabelas presentes no ATP-45 ainda é, em muitos contextos, realizada manualmente. Essa abordagem compromete a rapidez e pode gerar interpretações subjetivas, reduzindo a eficácia da resposta. Além disso, as soluções tecnológicas existentes que automatizam esses procedimentos são, em grande parte, de uso restrito, proprietárias ou de alto custo, o que limita seu acesso por instituições civis, gestores públicos e até mesmo por algumas forças militares.

Tanto o ATP-45 quanto a CGCFN-10-3 destacam que, para que a previsão da dispersão de agentes NBQR atinja seus objetivos, é fundamental que o ataque seja detectado rapidamente — seja por tropas em campo ou por sensores automáticos — e que os dados obtidos sejam transmitidos de forma ágil, padronizada e compreensível. Isso permite a emissão de mensagens NBQR claras e acionáveis, fundamentais para proteger vidas e mitigar os impactos do evento.

Diante dessas limitações, torna-se evidente a necessidade de um sistema próprio, que possibilite a automatização dos procedimentos descritos no ATP-45, com base em modelagem gráfica e matemática acessível e precisa. Este trabalho propõe, portanto, o desenvolvimento de um sistema computacional de previsão da dispersão de agentes NBQR, que funcione como uma ferramenta de apoio à decisão, com capacidade de receber dados inseridos manualmente ou oriundos de sensores automáticos.

Ao automatizar esse processo, o sistema busca melhorar significativamente a eficiência da resposta a incidentes NBQR, promovendo maior segurança, padronização das análises e agilidade na tomada de decisão.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema computacional para predição da dispersão de agentes NBQR, baseado no ATP-45 e na CGCFN-10.3.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Implementar modelos simplificados com base no ATP-45 e na CGCFN-10.3;
- Criar uma interface gráfica ou visualização geoespacial;
- Permitir entrada manual ou automática (sensores) de dados;
- Validar o sistema por meio de simulações utilizando parâmetros reais ou hipotéticos;
- Avaliar a aplicabilidade do sistema como ferramenta de apoio à decisão para operadores militares envolvidos em cenários NBQR.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ATP-45

O ATP-45 (Allied Tactical Publication - 45) é uma publicação técnica da OTAN que estabelece os procedimentos padronizados para alerta, notificação e previsão de áreas de perigo resultantes de incidentes NBQR. Trata-se de um documento essencial para garantir a resposta coordenada, interoperável e eficaz das forças terrestres, navais e aéreas da OTAN e de países parceiros diante de eventos envolvendo substâncias perigosas. Seu escopo abrange desde situações de guerra assimétrica e terrorismo até acidentes industriais de grandes proporções (NATO, 2019).

As principais finalidades do ATP-45, segundo NATO (2019) incluem:

- Notificação padronizada de ataques NBQR e detonações nucleares, bem como da contaminação decorrente;
- Previsão e alerta sobre áreas de risco a partir de modelos de dispersão atmosférica, estimando o alcance e a trajetória da pluma contaminada;
- Avaliação de informações NBQR, consolidando dados táticos, meteorológicos e geográficos para subsidiar a tomada de decisão pelos comandantes;
- Transmissão antecipada de alertas, tanto de agentes NBQR quanto de Materiais Industriais Tóxicos (TIMs), prevenindo danos maiores;
- Intercâmbio de relatórios padronizados, promovendo a comunicação eficaz entre unidades e países aliados durante operações conjuntas.

Uma das contribuições centrais do ATP-45 é a padronização das mensagens NBQR, cuja estrutura detalhada permite o envio rápido e preciso de dados críticos durante emergências. Essas mensagens são organizadas em seis categorias distintas, cada uma voltada para uma fase específica da resposta operacional (NATO, 2019):

- NBQR 1: Relatório inicial de um ataque NBQR, contendo informações preliminares sobre o incidente.
- NBQR 2: Relatório de passagem de uma nuvem NBQR, indicando a detecção da pluma em um determinado local e momento.
- NBQR 3: Relatório de área de contaminação, descrevendo as áreas afetadas e os níveis de contaminação.
- NBQR 4: Relatório de reconhecimento e monitoramento, fornecendo dados coletados por equipes de reconhecimento no campo.
- NBQR 5: Relatório de resumo de contaminação, consolidando informações sobre a contaminação em uma área maior.
- NBQR 6: Relatório de liberação de materiais tóxicos industriais (TIM), focado em incidentes envolvendo substâncias químicas perigosas não militares.

Segundo NATO (2019), cada mensagem contém parâmetros específicos que são

essenciais para a modelagem da dispersão e a previsão das áreas afetadas. Esses parâmetros incluem coordenadas geográficas precisas, tempo do incidente (data e hora), tipo de agente (químico, biológico, radiológico, nuclear), quantidade liberada (se conhecida) e dados meteorológicos detalhados, como direção e velocidade do vento, temperatura, umidade e estabilidade atmosférica. A padronização desses parâmetros permite que diferentes sistemas e nações interpretem e utilizem as informações de forma consistente.

O protocolo ATP-45 é aplicado em uma ampla gama de cenários, tanto em treinamento quanto em operações reais:

- **Exercícios Militares:** é a base para simulações e treinamentos de resposta a incidentes QBRN, permitindo que as Forças Armadas pratiquem a coordenação e a aplicação dos procedimentos em um ambiente controlado.

- **Operações Reais:** em caso de ataques ou acidentes NBQR, o ATP-45 orienta a coordenação da resposta, a proteção das forças e da população civil e a mitigação dos efeitos da contaminação.

- **Planejamento de Contingência:** auxilia no desenvolvimento de planos de resposta a emergências, na identificação de áreas de risco e na alocação de recursos para a defesa NBQR.

- **Desenvolvimento de Software:** serve como base para a criação de sistemas de predição e alerta, como o software proposto neste trabalho, garantindo que as ferramentas desenvolvidas sejam compatíveis com os padrões da OTAN e possam ser integradas em operações multinacionais.

Ao estabelecer uma linguagem comum, o ATP-45 desempenha papel central na construção de um quadro operacional unificado, fundamental para ações coordenadas em ambientes de alta complexidade. Além disso, sua adoção em contextos nacionais — como no caso do Brasil, por meio da norma CGCFN-10.3, reforça o compromisso com uma resposta técnica, padronizada e eficaz a emergências NBQR.

2.2 Influência de Fatores Meteorológicos e Ambientais na Dispersão de Agentes NBQR

A dispersão de agentes NBQR na atmosfera é um fenômeno complexo, intrinsecamente ligado a uma série de fatores meteorológicos e ambientais. A compreensão aprofundada desses fatores é crucial para a predição precisa da trajetória, concentração e persistência de uma pluma de contaminação, permitindo uma resposta eficaz e a mitigação de danos em caso de incidentes (MENDIL, 2022).

2.2.1 Fatores Meteorológicos

Os principais fatores meteorológicos que exercem influência significativa na dispersão de agentes NBQR incluem:

- **Velocidade e Direção do Vento:** são considerados os fatores mais determinantes na dispersão de poluentes atmosféricos (BRASIL, 2020). A direção do vento define o sentido geral para onde a pluma se deslocará, enquanto a velocidade do vento afeta diretamente a taxa de diluição e a distância que a pluma percorrerá. Ventos fortes tendem a dispersar os agentes mais rapidamente, cobrindo uma área maior, mas resultando em concentrações mais baixas. Por outro lado, ventos fracos levam a uma menor dispersão e a concentrações mais elevadas em áreas próximas à fonte de liberação, aumentando o risco local.

- **Estabilidade Atmosférica:** Refere-se à tendência da atmosfera de suprimir ou aumentar o movimento vertical do ar, o que impacta diretamente a mistura e a diluição dos poluentes. A estabilidade é influenciada pelo gradiente de temperatura (variação da temperatura com a altitude):

- **Precipitação (Chuva, Neve):** A precipitação pode remover agentes da atmosfera através de processos de lavagem, onde as gotas de chuva arrastam as partículas e gases para o solo, e deposição, onde os agentes são incorporados às nuvens antes da precipitação. Isso reduz a concentração no ar, mas pode levar à contaminação do solo e da água.

- **Temperatura e Umidade:** Afetam a taxa de evaporação de agentes líquidos e a persistência de agentes gasosos. A umidade também pode influenciar a formação de aerossóis e a reatividade de certos agentes químicos e biológicos.

2.2.2 Fatores Topográficos e Ambientais

De acordo com Mendil (2022), as características físicas do terreno e do ambiente também desempenham um papel crucial na dispersão:

- **Topografia:** montanhas, vales, colinas e cursos d'água podem alterar significativamente os padrões de vento e criar zonas de estagnação ou canalização. Vales, por exemplo, podem aprisionar poluentes devido a inversões térmicas e à falta de ventilação, enquanto montanhas podem desviar plumas.

- **Vegetação:** florestas e áreas com densa vegetação podem atuar como barreiras físicas, reduzindo a velocidade do vento e promovendo a deposição de partículas. No entanto, também podem reter agentes, prolongando a contaminação em certas áreas.

- **Áreas Urbanas:** a presença de edifícios e outras estruturas urbanas cria um ambiente complexo com turbulência e padrões de fluxo de ar alterados, podendo resultar em uma dispersão complexa e imprevisível, concentrando poluentes em ruas e becos.

- **Tipo de Superfície:** a rugosidade da superfície (cidades, florestas, campos abertos, água) afeta a turbulência e a velocidade do vento perto do solo, influenciando a dispersão vertical e horizontal dos agentes.

- **Absorção e Reatividade do Solo:** o tipo de solo, sua umidade e composição química podem influenciar a absorção de agentes químicos e biológicos, bem como sua degradação ou persistência no ambiente. Solos porosos, por exemplo, podem absorver mais agentes líquidos.

2.3 Modelos Matemáticos e Computacionais de Dispersão Atmosférica

A modelagem de dispersão atmosférica é fundamental para prever como os agentes perigosos se propagam e se dispersam na atmosfera. Essa previsão é crucial para a avaliação de riscos, o planejamento de emergências e a tomada de decisões em tempo real durante incidentes de natureza NBQR (BRASIL, 2020) (NATO, 2019).

Existem diversos tipos de modelos de dispersão, cada um com suas características, complexidade e aplicabilidade a diferentes cenários:

- Modelos Gaussianos: são os modelos mais simples e amplamente utilizados, especialmente para simular a dispersão de agentes de fontes contínuas em terrenos planos e homogêneos. Baseiam-se na premissa de que a distribuição da concentração do agente na pluma segue uma curva gaussiana em seções transversais. O Modelo de Pluma Gaussiana é um exemplo clássico, adequado para simulações de curto alcance e em condições meteorológicas estáveis. Sua simplicidade permite cálculos rápidos, mas sua precisão é limitada em cenários complexos, como áreas urbanas ou terrenos acidentados (PLATT e JONES, 2025).

- Modelos Lagrangianos: esses modelos acompanham o movimento de um grande número de partículas individuais ou "pacotes" de agentes à medida que se movem através da atmosfera. O movimento de cada partícula é determinado pelo campo de vento e pela turbulência atmosférica, que são simulados estocasticamente. Modelos Lagrangianos são mais complexos computacionalmente, mas oferecem maior flexibilidade e precisão para simulações de longo alcance, em condições meteorológicas variáveis e em terrenos complexos, pois podem representar melhor a trajetória real da pluma (VENTURA e DE MATTIA, 2023).

- Modelos Eulerianos: dividem o domínio atmosférico em uma grade tridimensional (células) e resolvem as equações de conservação de massa e energia para cada célula ao longo do tempo. Esses modelos podem incorporar processos físicos e químicos complexos, como reações químicas na atmosfera, deposição e remoção de agentes. São computacionalmente intensivos e exigem grande poder de processamento, mas são capazes de fornecer simulações detalhadas e abrangentes, especialmente para cenários de grande escala e com múltiplas fontes de emissão (VENTURA e DE MATTIA, 2023).

- Modelos de Sopro (Puff Models): simulam a liberação de poluentes como uma série de "sopros" discretos que se expandem e se movem com o vento. Cada sopro é tratado como uma pluma gaussiana em expansão. São particularmente úteis para simular liberações instantâneas ou de curta duração, como explosões ou vazamentos repentinos, permitindo o rastreamento da evolução da nuvem de poluentes ao longo do tempo (MCLEAN et al., 2011).

2.4 Trabalhos Anteriores e Soluções Similares

A área de predição de dispersão de agentes NBQR é um campo de pesquisa e desenvolvimento contínuo, impulsionado pela crescente necessidade de aprimorar a segurança e a capacidade de resposta a incidentes dessa natureza. Diversos trabalhos e soluções têm sido propostos com o objetivo de aumentar a acurácia dos modelos de previsão, integrar sensores a sistemas de simulação e desenvolver ferramentas que apoiem decisões críticas em tempo real. Estes estudos abordam aspectos que vão desde a estimativa da fonte do contaminante até a modelagem atmosférica em ambientes operacionais, servindo de base teórica e metodológica para novos desenvolvimentos, como o sistema que se propõe neste trabalho.

Haupt et al. (2008) apresenta uma arquitetura híbrida para fusão de dados de sensores e assimilação de condições meteorológicas, com o objetivo de melhorar a estimativa da dispersão de contaminantes durante eventos NBQR. O foco do estudo está na integração de sensores com modelos atmosféricos, associada à assimilação de dados meteorológicos em tempo real. Os autores identificam os principais desafios enfrentados por sistemas convencionais: a imprecisão sobre os parâmetros da fonte de liberação, a variabilidade dos dados atmosféricos e as limitações dos modelos turbulentos utilizados. Para contornar essas incertezas, os autores desenvolveram um sistema que utiliza algoritmos de otimização para retrocalcular a posição da fonte, a altura de liberação, a intensidade e o tempo do evento com base nas concentrações detectadas pelos sensores de campo. O modelo atmosférico é, então, continuamente realimentado com os dados mais recentes, garantindo uma atualização constante da previsão de dispersão.

A abordagem proposta por Haupt et al. (2008) tem contribuição direta para este trabalho, ao evidenciar a relevância da fusão de dados e da assimilação de informações meteorológicas no aprimoramento das estimativas de dispersão. O ciclo iterativo de predição e correção com base em observações, apresentado pelos autores, serve como inspiração direta para esta pesquisa, que também busca integrar sensores e dados meteorológicos a modelos dinâmicos, com o objetivo de aumentar a precisão das previsões — especialmente em cenários caracterizados por informações fragmentadas.

Liu, Gu e Liang (2019) abordam a estimativa da origem da contaminação com base em dados observacionais (problema inverso), e propõem um método de inferência Bayesiana que se vale da técnica de amostragem de Monte Carlo via cadeias de Markov (MCMC), aplicada sobre um modelo atmosférico direto. Essa abordagem probabilística permite estimar a posição e a intensidade da fonte mesmo quando há incertezas substanciais nos dados ou ausência de informações completas. A implementação do método foi realizada em MATLAB, e os testes demonstraram que os parâmetros reconstruídos da fonte convergiram para valores bastante próximos dos reais. Este trabalho é particularmente relevante para cenários operacionais em que a liberação do agente é desconhecida

ou encoberta, como em atentados terroristas, sendo um exemplo claro de como métodos estatísticos robustos podem aprimorar a capacidade de resposta.

No contexto do presente trabalho, a lógica de inferência inversa pode ser incorporada como um módulo complementar, permitindo que, mesmo em casos sem confirmação da origem, seja possível gerar previsões úteis com base em detecções esparsas.

Ventura e De Mattia (2023) exploram a integração de ferramentas NBQR especializadas em um ambiente sintético voltado à simulação operacional. O estudo destaca o uso de dois softwares amplamente adotados por forças armadas e agências civis: o CBRN Analysis, da Bruhn NewTech, e o SWORD, da MASA Group. O sistema proposto pelos autores permite simular em tempo real a propagação de agentes NBQR com base em dados meteorológicos dinâmicos, representando em ambiente gráfico e tático o impacto da contaminação. Um diferencial da abordagem está na ênfase à visualização integrada e à compatibilidade com os processos decisórios dos comandantes no terreno, aproximando a tecnologia das exigências do campo de batalha.

O presente trabalho adota uma filosofia semelhante ao propor um sistema que não apenas calcule a dispersão, mas que traduza essas informações em zonas operacionais padronizadas, compatíveis com doutrinas como o ATP-45, otimizando a resposta no teatro de operações.

McLean et al. (2011) faz uma revisão abrangente sobre o papel dos modelos de transporte e dispersão (T&D) na resposta a emergências NBQR. O artigo analisa a integração de sistemas amplamente utilizados, como ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), HPAC (Hazard Prediction and Assessment Capability) e outras ferramentas T&D, avaliando sua aplicabilidade, limitações e interoperabilidade. Um dos pontos centrais do estudo é a constatação de que muitos desses modelos têm dificuldades em representar adequadamente a complexidade de ambientes urbanos e industriais densamente povoados, especialmente no que se refere às variações microclimáticas e às interações com a infraestrutura. A análise crítica dos autores aponta para a necessidade de modelos mais responsivos, capazes de operar com dados em tempo real e de gerar visualizações táticas integradas.

Essa problemática abordada por McLean et al. (2011) é particularmente relevante para este projeto, que busca justamente incorporar elementos operacionais e responsivos, tornando as previsões úteis para decisões em nível tático e estratégico, inclusive em ambientes urbanos sensíveis.

Platt e Jones (2012) analisam a doutrina ATP-45 da OTAN, destacando suas limitações em cenários mais dinâmicos. Embora o ATP-45 seja uma referência internacionalmente padronizada para a previsão de áreas contaminadas, ele é baseado em templates estáticos com simulações de até duas horas, sem considerar as alterações temporais do campo de vento ou mudanças meteorológicas súbitas. Os autores propõem a integração de modelos dinâmicos de T&D para superar essas deficiências e oferecer uma previsão

mais adaptativa e refinada. Além disso, sugere-se que a compatibilidade com sistemas de comando e controle (C2) pode ser aprimorada por meio da digitalização e automatização dos processos de previsão.

Esta análise feita por Platt e Jones (2012) corrobora a proposta deste trabalho, que busca automatizar e dinamizar a aplicação dos conceitos do ATP-45, integrando modelos de dispersão a sistemas computacionais capazes de ajustar as previsões continuamente com base em dados meteorológicos em tempo real.

Por fim, Valle et al. (2025) oferecem uma abordagem inovadora baseada em inteligência artificial, propondo um sistema de machine learning para prever a dispersão atmosférica de agentes industriais, como cloro e metanol. Utilizando dados de simulações físicas e experimentais, os autores construíram um banco de dados extenso, que foi então processado por meio de técnicas como Análise de Componentes Principais (PCA) para redução de dimensionalidade e remoção de ruído. A seguir, os dados foram empregados no treinamento de modelos supervisionados, como redes neurais e máquinas de vetor de suporte (SVM), resultando em previsões precisas em diferentes cenários. O diferencial desta proposta está na capacidade do modelo de aprender padrões ocultos nos dados, aumentando a robustez em situações em que os modelos físicos tradicionais teriam baixa acurácia ou exigiriam muitos dados de entrada.

Este trabalho contribui diretamente para o presente estudo ao apontar a viabilidade da integração de modelos híbridos que combinem modelagem física com algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente na etapa de previsão rápida de áreas de risco baseada em dados de sensores.

De forma geral, os trabalhos analisados demonstram a diversidade de abordagens aplicadas à predição de dispersão de agentes NBQR, abrangendo desde métodos físicos tradicionais até técnicas estatísticas e soluções baseadas em inteligência artificial. Em comum, esses estudos apontam para a crescente demanda por sistemas mais responsivos, integrados a sensores de campo, capazes de lidar com incertezas e fornecer previsões adaptativas em tempo real. A presente pesquisa se apoia nessas contribuições para propor um sistema híbrido que, além de realizar simulações dinâmicas de transporte e dispersão, também automatiza a geração de zonas operacionais conforme a doutrina ATP-45, tornando a previsão mais ágil, precisa e compatível com o processo decisório em contextos táticos e estratégicos.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho tem como base os procedimentos descritos no manual ATP-45, aplicados à predição da dispersão de agentes químicos. O processo está dividido em duas etapas principais: predição simplificada, utilizada para a emissão de avisos imediatos, e predição detalhada, aplicada posteriormente com base em informações mais completas sobre o evento químico.

Nesta primeira versão do sistema, todos os dados utilizados para as predições são inseridos manualmente pelo operador, com base em observações locais, relatos de campo ou informações recebidas por outros meios. Não há, neste estágio, integração com sensores automáticos ou redes de monitoramento, mas a arquitetura do sistema foi projetada para suportar futuras integrações.

3.1 Predição Simplificada para Agentes Químicos

A predição simplificada é ativada quando ainda não há identificação do agente químico, servindo como base para um aviso imediato. Ela é dividida em dois casos, de acordo com a velocidade do vento:

- Caso 1 – velocidade do vento ≤ 10 km/h: dispersão sem direção predominante e de padrão radial, simulando uma propagação homogênea ao redor do ponto de liberação.
- Caso 2 – velocidade do vento > 10 km/h: dispersão com direção predominante e com maior concentração na direção do vento, simulando um deslocamento preferencial da nuvem química.

O processo consiste no recebimento das informações iniciais pelo operador:

- Local da liberação (coordenadas); e
- Velocidade e direção do vento (estimadas ou observadas localmente).

A seleção do caso é realizada automaticamente pelo sistema com base na velocidade do vento informada. Em seguida, o sistema gera uma estimativa da área potencialmente afetada, orientada pelo cenário identificado e pelos dados fornecidos pelo operador, oferecendo suporte à tomada de decisões iniciais e, se necessário, à ativação de procedimentos de proteção e evacuação.

3.2 Predição Detalhada para Agentes Químicos

A predição detalhada considera a identificação do agente químico, a persistência e o meio de liberação, permitindo cálculos mais precisos da área de risco:

- Tipo A - agente não persistente: dispersão aérea rápida, com menor impacto sobre superfícies;
- Tipo B - agente persistente: contaminação de superfícies e potencial de evaporação prolongada;

- Tipo C - natureza desconhecida: uso de estimativas conservadoras, baseadas em parâmetros genéricos do ATP-45.

Essas categorias influenciam os parâmetros de alcance, permanência e formato da área de risco. O sistema seleciona o modelo adequado de predição e ajusta a forma do polígono de risco, considerando:

- Velocidade e direção do vento;
- Raio da área de liberação;
- Comprimento da dispersão downwind;
- Estabilidade atmosférica (quando disponível).

3.3 Implementação Prática

O sistema foi implementado em Python 3.11, por sua robustez, facilidade de integração com bibliotecas de manipulação matemática e geográfica, e compatibilidade futura com sensores e APIs de dados geoespaciais.

3.3.1 Interface de Entrada

O operador insere os seguintes dados:

- Coordenadas (latitude e longitude);
- Velocidade do vento (em km/h);
- Direção do vento (em graus);
- Tipo de agente (quando conhecido);
- Meio de liberação (quando conhecido);
- Data e hora do evento.

Esses dados alimentam diretamente os algoritmos de classificação da predição.

3.3.2 Classificação da Predição

O sistema avalia se a predição será simplificada ou detalhada:

- Na predição simplificada, a velocidade do vento define a classificação em Caso 1 ou Caso 2, conforme o ATP-45;
- Na predição detalhada, são avaliados o tipo de agente e o meio de liberação, ajustando os parâmetros de alcance e permanência da área de risco.

3.3.3 Geração de Área de Risco

O sistema realiza cálculos geométricos para estimar a extensão da zona afetada. A modelagem considera:

- Vetorização da direção do vento desde o ponto de liberação;
- Comprimento da dispersão (downwind distance);
- Raio da área de liberação;
- Cálculo das regiões influenciadas (common length e polígono de risco).

As bibliotecas utilizadas incluem:

- NumPy e math: operações numéricas e trigonométricas;
- Shapely e GeoPandas: manipulação de geometrias vetoriais;
- Folium: visualização interativa em mapas.

3.3.4 Visualização Geográfica

As áreas de risco são plotadas sobre mapas interativos, permitindo identificar rapidamente:

- Ponto de liberação;
- Extensão estimada da dispersão;
- Regiões potencialmente afetadas.

O operador pode analisar diferentes cenários ajustando a velocidade do vento, direção, tipo de agente e meio de liberação.

4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O desenvolvimento do sistema computacional para previsão da dispersão de agentes NBQR foi estruturado com base no manual ATP-45 e na adaptação brasileira da CGCFN-10.3, buscando integrar metodologias preditivas a uma interface de visualização geoespacial interativa.

A escolha do Python 3.11 como linguagem-base foi motivada por sua robustez, vasta disponibilidade de bibliotecas para operações matemáticas, geográficas e de visualização, e compatibilidade futura com ferramentas de integração geoespacial e aquisição de dados em tempo real. O módulo Folium foi utilizado para geração de mapas interativos, permitindo ao operador visualizar em tempo real a localização da liberação e a extensão das áreas de risco. Para manipulação de geometria e cálculos vetoriais, foram empregadas as bibliotecas Shapely e GeoPandas, enquanto operações trigonométricas e numéricas foram tratadas com NumPy e math.

O sistema segue uma arquitetura modular, com destaque para três componentes principais:

- Entrada de dados: responsável por receber informações sobre o evento NBQR, como coordenadas da liberação, velocidade e direção do vento, tipo de agente e meio de lançamento, quando disponíveis.
- Processamento e predição: realiza o cálculo da área de risco, definindo parâmetros de dispersão e modelando geograficamente a pluma ou área afetada.
- Visualização geoespacial: gera mapas interativos com a área de risco, permitindo análise rápida e suporte à decisão operacional.

Essa estrutura permite que cada módulo seja mantido e atualizado independentemente, facilitando futuras integrações com sensores automáticos ou APIs externas.

O fluxo do sistema pode ser representado pelo seguinte pseudo-código:

```
# Fluxo do Sistema de Predição NBQR

Entrada de Dados:
    Receber coordenadas, velocidade do vento, agente químico, meio
    de lançamento

Classificação:
    Se o agente é conhecido:
        Selecionar predição detalhada
    Senão:
        Selecionar predição simplificada

Cálculo da Área de Risco:
```

```
Aplicar fórmulas de dispersão
Definir extensão e formato da zona afetada
```

Visualização:

```
Plotar área de risco em mapa interativo
Destacar origem, direção do vento e perímetro de alerta
```

4.1 Módulo de Definição dos Agentes Químicos

O primeiro componente do sistema desenvolvido é o módulo `agentes_quimicos.py`, cuja função é organizar e classificar os agentes NBQR, neste caso limitados aos agentes químicos. Os agentes são divididos conforme sua persistência, critério amplamente adotado em doutrinas NBQR e descrito no manual ATP-45.

Os agentes não persistentes caracterizam-se por apresentarem rápida evaporação ou decomposição, produzindo efeitos imediatos, mas de curta duração. Já os persistentes mantêm-se ativos por períodos prolongados, contaminando superfícies e áreas por horas ou dias.

O módulo foi estruturado da seguinte forma:

```
# agentes_quimicos.py

%%writefile agentes_quimicos.py

"""
Lista de agentes químicos utilizados no sistema NBQR.
Separados entre persistentes e não persistentes.
"""

# Agentes químicos não persistentes
agentes_ao_persistentes = {
    "sarin", "tabun", "soman", "gf",
    "cloro", "fosgênio", "difosgênio", "óxidos de nitrogênio",
    "scl2", "bf3",
    "cianeto de hidrogênio", "cloreto de cianogênio", "arsina", "
    monóxido de carbono",
    "cs", "cn", "cr", "bromoacetona", "ca", "cba",
    "amônia", "gás natural", "cloreto de hidrogênio",
    "formaldeído", "dióxido de enxofre", "brometo de metila"
}

# Agentes químicos persistentes
```

```

agentes_persistentes = {
    "vx", "vr", "ve", "vm", "vg",
    "mostarda", "hd", "t", "hl", "q",
    "mostarda nitrogenada", "hn1", "hn2", "hn3",
    "lewisita", "l", "sa",
    "adamsita", "dm", "da",
    "mercúrio", "tricloroetileno", "tetracloroeto de carbono",
    "benzeno", "dioxinas", "pcbs"
}

```

A estrutura de dados utilizada foi o conjunto (set), que permite busca rápida e eficiente, ideal para comparação durante o processo de classificação da predição. Durante a execução do sistema, o agente informado pelo usuário é comparado com essas coleções, determinando automaticamente se o modelo de dispersão será persistente ou não persistente, ajustando assim a extensão da área de risco e o tempo de permanência da contaminação.

4.2 Módulo de Conversão Geográfica

O módulo `utils.py` fornece funções auxiliares para cálculos geográficos essenciais à geração das áreas de risco NBQR. Como o sistema utiliza coordenadas geográficas (latitude e longitude) para posicionar o ponto de liberação do agente e desenhar a dispersão no mapa, é necessário converter distâncias lineares (metros) em graus geográficos, considerando a curvatura da Terra e a latitude do ponto de referência.

A função principal do módulo é:

```

# utils.py
from math import cos, sin, radians

def meters_to_latlon_distances(meters, lat):
    """
    Converte deslocamento em metros para graus de latitude e
    longitude considerando a latitude atual (em graus).
    """
    delta_lat = meters / 111320 # metros para graus latitude
    delta_lon = meters / (40075000 * cos(radians(lat))) / 360 #
        metros para graus longitude
    return delta_lat, delta_lon

```

4.2.1 Funcionamento

Entrada:

- meters: deslocamento linear em metros.
- lat: latitude do ponto de referência (em graus).

Processamento:

- delta_lat: calcula o deslocamento equivalente em graus de latitude, utilizando uma aproximação média de 111.320 metros por grau.

- delta_lon: calcula o deslocamento equivalente em graus de longitude, ajustado pelo fator de latitude ($\cos(\text{radians}(\text{lat}))$) devido à convergência dos meridianos.

Saída:

- delta_lat, delta_lon: deslocamentos em graus, que podem ser aplicados diretamente às coordenadas do ponto de liberação do agente químico.

Esse módulo é crítico para a precisão geoespacial do sistema, permitindo que as áreas de risco calculadas matematicamente sejam representadas corretamente em mapas interativos, como o Folium.

4.3 Módulo de Geração e Visualização da Área de Risco

O módulo `hazard_area.py` é responsável por implementar a função que calcula e desenha os polígonos que representam as áreas de risco de agentes químicos e que serão utilizados na fase da predição. Ele integra cálculos geométricos, vetoriais e de dispersão, permitindo que o operador visualize rapidamente a extensão e a forma da zona afetada.

A função principal do módulo é `draw_hazard_area_generic`, que recebe os parâmetros do evento e desenha no mapa tanto a área de liberação quanto o polígono de risco.

4.3.1 Parâmetros de Entrada

Os parâmetros de entrada da função `draw_hazard_area_generic` são:

```
# hazard_area.py

%%writefile hazard_area.py

import folium
from math import sin, cos, radians, sqrt
from utils import meters_to_latlon_distances

def draw_hazard_area_generic(
```

```

map_object,          # Objeto Folium do mapa onde a área
    será desenhada
source_location,    # Coordenadas da fonte de liberação
    (lat, lon)
wind_speed,         # Velocidade do vento (km/h)
wind_direction,     # Direção do vento (0 a 360 graus)
radius_release_area, # Raio do círculo de liberação em
    metros
downwind_distance,  # Distância na direção do vento em
    metros
common_length,     # Comprimento usado para desenhar o
    polígono
meio_de_lancamento=None, # Tipo de lançamento (informativo)
estabilidade_do_ar=None, # Estabilidade atmosférica (
    informativo)
desenhar_poligono_condicional=False # Flag para desenhar ou não
    polígono detalhado
)

```

4.3.2 Fluxo do Algoritmo

1. Plotagem da Área de Liberação: um círculo vermelho é desenhado no ponto de origem, indicando o local do incidente e a área inicial de liberação:

```

# Desenha um círculo no mapa indicando a área de liberação do
    agente químico
folium.Circle(
    location=source_location,          # Coordenadas do centro do cí
        rculo (latitude, longitude)
    radius=radius_release_area,        # Raio do círculo em metros
    color='red',                       # Cor da borda do círculo
    fill=True,                         # Preencher o interior do cí
        rculo
    fill_opacity=0.6,                 # Opacidade do preenchimento
        (0.0 transparente, 1.0 opaco)
    popup=f'Área de Liberação ({radius_release_area / 1000} km)' #
        Texto exibido ao clicar no círculo
).add_to(map_object)                  # Adiciona o círculo ao objeto
    do mapa Folium

```

Além disso, um marcador é colocado no ponto de origem do incidente:

```

# Desenha um marcador pequeno no centro da área de liberação,
  indicando a posição exata da fonte do incidente
folium.CircleMarker(
    location=source_location,    # Coordenadas do marcador (latitude
        , longitude)
    radius=1,                    # Tamanho do marcador em pixels
    color='black',              # Cor da borda do marcador
    fill=True,                  # Preenche o marcador com cor sólida
    fill_color='black',        # Cor do preenchimento do marcador
    fill_opacity=1,            # Opacidade total (marcador
        totalmente visível)
    popup='Fonte do Incidente'  # Texto exibido ao clicar no
        marcador
).add_to(map_object)           # Adiciona o marcador ao objeto do
    mapa Folium

```

2. Verificação de Vento Fraco: se a velocidade do vento for menor que 10 km/h, a dispersão é considerada radial, e apenas um círculo de perigo é desenhado:

```

# Verifica se a velocidade do vento é menor ou igual a 10 km/h
if wind_speed <= 10:
    # Desenha um círculo de perigo fixo de 10 km ao redor da fonte
    folium.Circle(
        location=source_location,    # Centro do círculo (local da
            liberação)
        radius=10000,                # Raio do círculo em metros (10
            km)
        color='red',                 # Cor da borda do círculo
        fill=True,                   # Preenche o círculo com cor sólida
            lida
        fill_opacity=0.2,            # Opacidade do preenchimento (
            semi-transparente)
        popup='Área de Perigo (10 km)' # Texto exibido ao clicar
            no círculo
    ).add_to(map_object)              # Adiciona o círculo ao mapa

    # Retorna imediatamente, pois para vento fraco não há polígono
    detalhado
return

```

3. Cálculo do Ponto Downwind: para ventos superiores a 10 km/h, a função calcula o ponto a favor do vento usando a função `meters_to_latlon_distances` do módulo `utils.py`:

```
# Converte a distância downwind (em metros) para deslocamento em
  latitude e longitude
delta_lat, delta_lon = meters_to_latlon_distances(downwind_distance
, lat)

# Calcula o ponto "downwind" na direção do vento
downwind_point = (
    lat + delta_lat * sin(angle_rad), # Ajusta a latitude
      considerando a direção do vento
    lon + delta_lon * cos(angle_rad) # Ajusta a longitude
      considerando a direção do vento
)
```

Esse ponto representa o limite inicial da dispersão na direção do vento.

4. Desenho do Polígono: a partir do ponto downwind, o módulo constrói linhas perpendiculares e inclinadas para formar os triângulos laterais do polígono. Em seguida, o polígono é fechado, criando a área de risco completa:

```
# Calcula os pontos extremos superior e inferior da linha
  perpendicular a direção do vento
upper_perpendicular = (
    downwind_point[0] + delta_perp_lat * sin(perp_angle), #
      latitude do ponto superior
    downwind_point[1] + delta_perp_lon * cos(perp_angle) #
      longitude do ponto superior
)
lower_perpendicular = (
    downwind_point[0] - delta_perp_lat * sin(perp_angle), #
      latitude do ponto inferior
    downwind_point[1] - delta_perp_lon * cos(perp_angle) #
      longitude do ponto inferior
)

# Desenha a linha perpendicular central, que conecta os extremos
  superior e inferior
folium.PolyLine(
    locations=[upper_perpendicular, lower_perpendicular],
```

```

    color='black',      # cor da linha
    weight=1,          # espessura
    dash_array='5,5',  # linha tracejada
).add_to(map_object)

# Desenha as linhas inclinadas a partir dos extremos superior e
  inferior (essas linhas formam os triângulos laterais do polígono
    de dispersão)
for angle_offset, color, start_pt in zip([60, 120], ['black', '
black'], [upper_perpendicular, lower_perpendicular]):
    draw_line(start_pt, perp_angle, angle_offset, color,
              common_length)

# Fecha o polígono de risco conectando os pontos calculados
folium.Polygon(
    locations=[
        upper_perpendicular, # ponto superior da linha
            perpendicular
        blue_end_point,      # extremidade da linha inclinada
            superior
        green_end_point,     # extremidade da linha inclinada
            inferior
        lower_perpendicular # ponto inferior da linha
            perpendicular
    ],
    color='red',            # cor da borda do polígono
    weight=2,              # espessura da borda
    fill=True,             # habilita preenchimento
    fill_opacity=0.2,     # transparência do preenchimento
    popup='Polígono Fechado' # tooltip ao clicar
).add_to(map_object)

```

5. Camada Final da Área de Liberação: um círculo reforçado é desenhado sobre a área de liberação para destacar a origem do incidente.

```

# Desenha um círculo reforçado sobre a área de liberação (esse cí
  rculo destaca visualmente a origem do incidente no mapa)
folium.Circle(
    location=source_location, # coordenadas da fonte do agente qu
        ímico
    radius=radius_release_area, # raio da área de liberação em

```

```

    metros
    color='red',           # cor da borda do círculo
    fill=True,           # habilita preenchimento do círculo
    fill_opacity=0.7,    # define a opacidade do
        preenchimento (70%)
    popup='Área de Liberação' # texto exibido ao clicar no cí
        rculo
).add_to(map_object)

```

4.3.3 Observações

O módulo utiliza Folium para renderização interativa, permitindo integração com mapas reais, como OpenStreetMap ou Mapbox.

Todos os cálculos de deslocamento são feitos considerando a latitude do ponto de origem, garantindo precisão geográfica.

O desenho do polígono segue o padrão do ATP-45, incluindo distinção entre dispersão radial e direcionada, bem como os limites laterais da zona de risco.

4.4 Módulo de Geração e Visualização da Área de Risco para Espargimento

Quando o agente químico é liberado por espargimento, a geometria dos polígonos que representam sua dispersão apresenta particularidades que diferem das utilizadas para outros tipos de lançamento, os quais utilizam a função `draw_hazard_area_generic` descrita na seção anterior.

Para lidar com essa situação específica, foi desenvolvido o módulo `espargimento.py`, que contém duas funções principais:

- `desenhar_area_espargimento`, destinada a cenários com vento inferior a 10 km/h;
- `desenhar_area_espargimento2`, destinada a cenários com vento superior a 10 km/h.

Essas funções permitem modelar com precisão a dispersão dos agentes, ajustando a geometria dos polígonos de acordo com as condições de vento e a configuração do espargimento.

4.4.1 Parâmetros de Entrada

As funções de espargimento recebem:

```

# espargimento.py

%%writefile espargimento.py

import math
from math import radians, cos, sin, sqrt
import folium
from utils import meters_to_latlon_distances

# Função de espargimento com velocidade do vento menor que 10 km/h
def desenhar_area_espargimento(
    map_obj,
    source,                    # Coordenadas da primeira fonte (lat,
        lon)
    source_final,            # Coordenadas da segunda fonte (lat,
        lon)
    wind_speed,              # Velocidade do vento (km/h)
    wind_direction,          # Direção do vento (0-360 graus)
    radius_release_area,     # Raio do círculo de liberação (m)
    downwind_distance,      # Distância downwind (m)
    common_length,          # Comprimento comum para linhas
    meio_de_lancamento,     # Tipo de lançamento (informativo)
    draw_hazard_area_generic # Função para desenhar hazard area
        genérica
)

```

4.4.2 Fluxo do Algoritmo

1. Plotagem das Áreas de Liberação: para cada fonte, desenha-se um círculo vermelho indicando a área inicial de liberação:

```

# Desenha a primeira área de liberação
folium.Circle(
    location=source,
    radius=radius_release_area, # Raio em metros
    color='red',                # Cor da borda
    fill=True,                  # Preenche o círculo
    fill_opacity=0.7,          # Opacidade do preenchimento
    popup='Área de Liberação - source'
).add_to(map_obj)

```

```
# Desenha a segunda área de liberação
folium.Circle(
    location=source_final,
    radius=radius_release_area,
    color='red',
    fill=True,
    fill_opacity=0.7,
    popup='Área de Liberação - source_final'
).add_to(map_obj)
```

2. Vento ≤ 10 km/h – Dispersão Radial: para ventos fracos, a dispersão é radial. A função apenas desenha círculos de perigo em torno das fontes:

```
# Desenha a área de risco detalhada para a primeira fonte usando a
função genérica
draw_hazard_area_generic(
    map_object=map_obj, # Objeto do mapa Folium
    source_location=source, # Coordenadas da primeira
    fonte (lat, lon)
    wind_speed=wind_speed, # Velocidade do vento
    wind_direction=wind_direction, # Direção do vento
    radius_release_area=radius_release_area, # Raio da área de
    liberação
    downwind_distance=downwind_distance, # Distância downwind
    common_length=common_length, # Comprimento comum das
    linhas do polígono
    meio_de_lancamento=meio_de_lancamento, # Meio de lançamento
    (informativo)
    estabilidade_do_ar='', # Não especificado para
    espargimento
    desenhar_poligono_condicional=True # Ativa o desenho do polí
    gono detalhado
)

# Desenha a área de risco detalhada para a segunda fonte da mesma
forma
draw_hazard_area_generic(
    map_object=map_obj,
    source_location=source_final,
    wind_speed=wind_speed,
```

```

wind_direction=wind_direction,
radius_release_area=radius_release_area,
downwind_distance=downwind_distance,
common_length=common_length,
meio_de_lancamento=meio_de_lancamento,
estabilidade_do_ar=' ',
desenhar_poligono_condicional=True
)

```

3. Vento >10 km/h – Dispersão Direcionada: para ventos mais fortes, o algoritmo constrói o polígono completo seguindo o padrão do ATP-45:

```

# Calcula o vetor entre as duas fontes
dx = lon2 - lon1 # diferença de longitude
dy = lat2 - lat1 # diferença de latitude
comprimento = math.sqrt(dx**2 + dy**2) # comprimento do vetor

# Calcula o vetor perpendicular normalizado
perp_dx = -dy/comprimento
perp_dy = dx/comprimento

# Define o deslocamento perpendicular de 1 km
offset_metros = 1000 # 1 km

# Converte deslocamento em metros para coordenadas geográficas
delta_lat, _ = meters_to_latlon_distances(offset_metros * perp_dy,
    (lat1 + lat2)/2)
_, delta_lon = meters_to_latlon_distances(offset_metros * perp_dx,
    (lat1 + lat2)/2)

# Pontos das linhas paralelas superior e inferior
p1_sup = (lat1 + delta_lat, lon1 + delta_lon)
p2_sup = (lat2 + delta_lat, lon2 + delta_lon)
p2_inf = (lat2 - delta_lat, lon2 - delta_lon)
p1_inf = (lat1 - delta_lat, lon1 - delta_lon)

# Desenha as linhas paralelas
folium.PolyLine(locations=[p1_sup, p2_sup], color='red', weight=2).
    add_to(map_obj)
folium.PolyLine(locations=[p1_inf, p2_inf], color='red', weight=2).
    add_to(map_obj)

```

```
# Desenha o polígono preenchido entre as linhas paralelas
folium.Polygon(
    locations=[p1_sup, p2_sup, p2_inf, p1_inf],
    color='red',
    weight=2,
    fill=True,
    fill_color='red',
    fill_opacity=0.3
).add_to(map_obj)
```

4. Calcula os pontos downwind a favor do vento e desenha os polígonos:

```
# Ajuste da direção do vento para cálculo de dispersão
angle_rad = radians((wind_direction - 90) % 360)

# Loop para processar cada ponto de liberação (inicial e final)
for lat, lon in [source, source_final]:
    # Calcula deslocamento downwind em metros
    delta_lat_m = downwind_distance * sin(angle_rad)
    delta_lon_m = downwind_distance * cos(angle_rad)

    # Converte deslocamento de metros para graus geográficos
    delta_lat_deg, _ = meters_to_latlon_distances(delta_lat_m, lat)
    _, delta_lon_deg = meters_to_latlon_distances(delta_lon_m, lat)

    # Ponto final na direção do vento
    downwind_point = (lat + delta_lat_deg, lon + delta_lon_deg)

    # Linha do círculo de liberação até o ponto downwind
    folium.PolyLine(
        locations=[(lat, lon), downwind_point],
        color='white',
        weight=0.1,
        dash_array='5,5'
    ).add_to(map_obj)

    # Cálculo de linha perpendicular e triângulo de dispersão
    side_length = (2 / sqrt(3)) * (downwind_distance + 2 *
        radius_release_area)
    perp_angle = angle_rad + radians(90)
```

```

delta_perp_lat, delta_perp_lon = meters_to_latlon_distances(
    side_length / 2, lat)

# Pontos extremos superior e inferior da linha perpendicular
upper_perp = (downwind_point[0] + delta_perp_lat * sin(
    perp_angle),
              downwind_point[1] + delta_perp_lon * cos(
                perp_angle))
lower_perp = (downwind_point[0] - delta_perp_lat * sin(
    perp_angle),
              downwind_point[1] - delta_perp_lon * cos(
                perp_angle))

# Desenha linha central perpendicular
folium.PolyLine(
    locations=[upper_perp, lower_perp],
    color='black',
    weight=1,
    dash_array='5,5'
).add_to(map_obj)

# Função auxiliar para desenhar linhas inclinadas a partir da
perpendicular
def draw_line(start_point, base_angle, angle_offset_deg, color,
length):
    """
    Desenha uma linha a partir de um ponto inicial, com ângulo
    offset
    em relação a base_angle e comprimento especificado.
    Retorna o ponto final da linha.
    """
    angle = base_angle - radians(angle_offset_deg)
    delta_lat_line, delta_lon_line = meters_to_latlon_distances(
        length, start_point[0])
    end_point = (start_point[0] - delta_lat_line * sin(angle),
                 start_point[1] - delta_lon_line * cos(angle))
    folium.PolyLine(
        locations=[start_point, end_point],
        color=color,
        weight=1,

```

```

        dash_array='5,5'
    ).add_to(map_obj)
    return end_point

# Desenha linhas inclinadas e captura os pontos finais
blue_end = draw_line(upper_perp, perp_angle, 60, 'blue', 12000)
green_end = draw_line(lower_perp, perp_angle, 120, 'green', 12000)

# Fecha o polígono principal com os pontos calculados
folium.Polygon(
    locations=[upper_perp, blue_end, green_end, lower_perp],
    color='red',
    weight=2,
    fill=True,
    fill_opacity=0.2,
    popup='Polígono Fechado'
).add_to(map_obj)

# Polígono adicional unindo bases inferiores (opcional, para
    visualização)
folium.Polygon(
    locations=[bases[0][0], bases[0][1], bases[1][1], bases[1][0]],
    color='red',
    weight=1,
    fill=True,
    fill_opacity=0.2,
    tooltip='Área unindo bases inferiores'
).add_to(map_obj)

```

4.5 Módulo de Predições

O módulo `predicoes.py` é responsável por integrar as funções de cálculo e visualização das áreas de risco de agentes químicos, combinando a geometria das áreas de liberação com os efeitos de dispersão atmosférica. Ele utiliza as funções dos módulos `hazard_area.py` e `espargimento.py` para desenhar polígonos detalhados, considerando tanto cenários simplificados quanto detalhados, persistentes e não persistentes.

4.5.1 Funções Principais

O módulo contém três funções principais de predição:

1. Predição Simplificada (executar_predicao_simplificada):

Desenha apenas a área genérica de risco em torno da fonte do agente usando `draw_hazard_area_generic`. É ativada quando o agente químico ainda não foi identificado, oferecendo uma estimativa inicial da área potencialmente afetada. Ela considera principalmente a velocidade e direção do vento, classificando o cenário em dois casos:

- Caso 1 – vento ≤ 10 km/h: dispersão radial, sem direção predominante.
- Caso 2 – vento > 10 km/h: dispersão orientada na direção do vento, com maior concentração na frente da liberação.

Trecho de código que implementa a predição simplificada:

```
# Predição simplificada

def executar_predicao_simplificada(map_obj, source, wind_speed,
    wind_direction):
    """
    Calcula a área de risco inicial baseada apenas na velocidade e
    direção do vento,
    quando o agente químico ainda não é identificado.
    """
    # Chama a função genérica que desenha a área de risco no mapa
    draw_hazard_area_generic(
        map_object=map_obj,          # Objeto do mapa folium onde o
            polígono será desenhado
        source_location=source,      # Local da fonte do incidente (
            latitude, longitude)
        wind_speed=wind_speed,       # Velocidade do vento em km/h
        wind_direction=wind_direction, # Direção do vento em
            graus (0 a 360 graus)
        radius_release_area=2000,    # Raio de liberação inicial em
            metros
        downwind_distance=10000,     # Distância estimada na direção
            do vento
        common_length=12600,         # Comprimento do polígono de
            risco
        desenhar_poligono_condicional=False
    )
```

Este trecho demonstra a simplicidade do modelo inicial, baseado em parâmetros fixos para uma resposta imediata.

2. Predição para Agentes Não Persistentes (`executar_predicao_nao_persistente`):

Essa função solicita ao operador informações sobre a estabilidade do ar e o meio de lançamento do agente químico, permitindo ajustar os parâmetros de dispersão de acordo com o cenário real. Com base nessas informações, calcula-se a distância downwind e o comprimento das linhas do polígono (`common_length`), antes de chamar a função `draw_hazard_area_generic` com o polígono detalhado.

O algoritmo segue os seguintes passos:

1. Solicita ao usuário a estabilidade do ar (instável, neutra ou estável) e o meio de lançamento.
2. Normaliza os valores informados e obtém os parâmetros de dispersão com a função `obter_parametros_por_estabilidade`.
3. Chama `draw_hazard_area_generic` para desenhar o polígono detalhado da área de risco.

Trecho de código que implementa a predição não persistente:

```
# Predição para agentes não persistentes

def executar_predicao_nao_persistente(map_obj, source, wind_speed,
wind_direction):
    """
    Executa a predição detalhada para agentes químicos não
    persistentes
    """

    # Solicita ao usuário a estabilidade do ar (instável, neutra ou
    estável)
    estabilidade_do_ar = input("Digite a estabilidade do ar (instá
    vel, neutra ou estável): ").strip().lower()

    # Solicita ao usuário o meio de lançamento do agente
    meio_de_lancamento = input("Digite o meio de lançamento: ").
    strip().lower()

    # Calcula a distância na direção do vento e o comprimento do
    polígono com base nos parâmetros de estabilidade do ar e
    meio de lançamento
    downwind_distance, common_length =
    obter_parametros_por_estabilidade(estabilidade_do_ar,
    meio_de_lancamento)
```

```

# Chama a função genérica que desenha a área de risco no mapa
draw_hazard_area_generic(
    map_object=map_obj,          # Objeto do mapa folium
    source_location=source,     # Coordenadas da fonte do
        incidente
    wind_speed=wind_speed,      # Velocidade do vento em km/
        h
    wind_direction=wind_direction, # Direção do vento em graus
    radius_release_area=1000,    # Raio da área de liberação
        (1 km para não persistentes)
    downwind_distance=downwind_distance, # Distância na direç
        ão do vento calculada
    common_length=common_length, # Comprimento do polígono de
        risco
    meio_de_lancamento=meio_de_lancamento, # Meio de lançamento
        informado
    estabilidade_do_ar=estabilidade_do_ar, # Estabilidade do ar
        informada
    desenhar_poligono_condicional=True # Ativa o desenho do
        polígono detalhado
)

```

3. Predição para Agentes Persistentes (`executar_predicao_persistente`):

Projetada para cenários em que o agente químico permanece ativo por mais tempo, esta função pode tratar tanto casos de espargimento quanto de outros meios de lançamento (bombas, mísseis, granadas, etc.).

O algoritmo segue os seguintes passos:

1. Solicita ao operador o meio de lançamento.
2. Para meios de espargimento, solicita coordenadas finais.
3. Define `radius_release_area`, `downwind_distance` e `common_length` com base no tipo de meio e na velocidade do vento.
4. Chama a função de espargimento adequada, que calcula a predição para espargimento ou usa `draw_hazard_area_generic` para outros meios.

Trecho de código que implementa a predição persistente:

```

# Predição para agentes persistentes

def executar_predicao_persistente(map_obj, source, wind_speed,
    wind_direction):

```

```

"""
Executa a predição detalhada para agentes químicos persistentes
"""

# Solicita ao usuário o meio de lançamento do agente
meio_de_lancamento = input("Digite o meio de lançamento: ").
    strip().lower()

# Caso o meio seja de espargimento (ex.: aerossol, gerador)
if meio_de_lancamento in ['espargimento', 'gerador']:
    # Solicita as coordenadas finais do espargimento (lat, lon)
    source_final = tuple(map(float, input("Digite latitude e
        longitude finais separadas por espaço: ").split()))

    # Define parâmetros fixos para o espargimento
    radius_release_area = 1000 # Raio do círculo de liberação
        em metros
    downwind_distance = 10000 # Distância downwind em metros
    common_length = downwind_distance

    # Escolhe a função de desenho de acordo com a vel do vento
    if wind_speed <= 10:
        # Vento menor ou igual a 10 km/h: usa função de
            espargimento para baixa velocidade
        desenhar_area_espargimento(
            map_obj=map_obj,
            source=source,
            source_final=source_final,
            radius_release_area=radius_release_area,
            downwind_distance=downwind_distance,
            common_length=common_length,
            wind_speed=wind_speed,
            wind_direction=wind_direction,
            meio_de_lancamento=meio_de_lancamento,
            draw_hazard_area_generic=draw_hazard_area_generic
        )
    else:
        # Vento maior que 10 km/h: usa função de espargimento
            para alta velocidade
        desenhar_area_espargimento2(
            map_obj=map_obj,

```

```

        source=source ,
        source_final=source_final ,
        radius_release_area=radius_release_area ,
        downwind_distance=downwind_distance ,
        common_length=common_length ,
        wind_speed=wind_speed ,
        wind_direction=wind_direction ,
        meio_de_lancamento=meio_de_lancamento ,
        draw_hazard_area_generic=draw_hazard_area_generic
    )
# Para outros meios de lançamento que não sejam de espargimento
else:
    draw_hazard_area_generic(
        map_object=map_obj,          # Objeto do mapa folium
        source_location=source,      # Coordenadas da fonte do
            incidente
        wind_speed=wind_speed,       # Velocidade do vento em km/h
        wind_direction=wind_direction, # Direção do vento
            em graus
        radius_release_area=1000, # Raio padrão de liberação em
            metros
        downwind_distance=10000, # Distância padrão na direção
            do vento
        common_length=12000, # Comprimento padrão do polígono
        meio_de_lancamento=meio_de_lancamento, # Meio de
            lançamento
        estabilidade_do_ar=' ', # Não considera estabilidade
            para persistentes
        desenhar_poligono_condicional=True # Ativa desenho do
            polígono detalhado
    )

```

4.5.2 Script Principal

O script `main.py` integra todos os módulos e solicita ao usuário os dados de entrada. Dependendo do tipo de agente químico, chama a função de predição apropriada:

```

# main.py

import folium
from agentes_quimicos import agentes_nao_persistentes

```

```

from agentes_quimicos import agentes_persistentes
from predicoes import executar_predicao_simplificada
from predicoes import executar_predicao_nao_persistente
from predicoes import executar_predicao_persistente

def main():
    """
    Função principal que executa a predição de dispersão de agentes
    químicos e retorna o mapa interativo com a área de risco
    """

    # Solicita as coordenadas da fonte do incidente (lat, lon)
    source = tuple(map(float, input("Digite latitude e longitude
    separadas por espaço: ").split()))

    # Solicita a velocidade do vento (km/h)
    wind_speed = float(input("Digite a velocidade do vento (km/h):
    "))

    # Solicita a direção do vento (0 a 360 graus)
    wind_direction = float(input("Digite a direção do vento (0 a
    360 graus): "))

    # Cria o mapa folium centrado na fonte de liberação
    map_obj = folium.Map(location=source, zoom_start=12)

    # Solicita ao usuário o tipo de agente químico
    agente_quimico = input("Digite o tipo de agente químico: ").
    strip().lower()

    # Escolhe a função de predição com base no tipo de agente
    if agente_quimico in agentes_nao_persistentes:
        # Agente não persistente: predição detalhada para não
        persistentes
        executar_predicao_nao_persistente(map_obj, source,
        wind_speed, wind_direction)
    elif agente_quimico in agentes_persistentes:
        # Agente persistente: predição detalhada para persistentes
        executar_predicao_persistente(map_obj, source, wind_speed,
        wind_direction)
    else:

```

```
# Agente não identificado: predição simplificada
print(f"Agente químico não identificado. Usando predição
      simplificada.")
executar_predicao_simplificada(map_obj, source, wind_speed,
                               wind_direction)

# Retorna o objeto do mapa com a área de risco desenhada
return map_obj

# Executa a função main quando o script é rodado diretamente
if __name__ == "__main__":
    mapa = main()

# Exibe o mapa gerado
mapa
```

5 RESULTADOS

O sistema de análise preditiva da dispersão de agentes químicos, desenvolvido em linguagem Python e integrado à biblioteca Folium para visualização geoespacial interativa, foi testado em diferentes cenários representativos das condições descritas no ATP-45 da OTAN.

Os testes foram realizados utilizando como ponto de liberação a coordenada (-22.941, -43.1798), correspondente à região sul do Rio de Janeiro, e considerando o vento soprando de sul para norte, ou seja, direção 90°. Essa configuração permite observar claramente a geometria das áreas de risco em diferentes regimes de vento, estabilidade atmosférica e meios de lançamento.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para cada tipo de predição implementada no sistema.

5.1 Predição Simplificada

A predição simplificada é utilizada quando o agente químico ainda não foi identificado, oferecendo uma estimativa inicial da área potencialmente afetada com base apenas na velocidade e direção do vento.

Dois casos são considerados:

Caso 1 – vento ≤ 10 km/h: dispersão radial, sem direção predominante, representada por um círculo de 10 km de raio em torno da área de liberação.

Caso 2 – vento > 10 km/h: dispersão orientada na direção do vento, com alongamento da área de risco no sentido norte.

A Figura 1 e a Figura 2 ilustram os resultados gerados automaticamente pelo sistema para cada caso.

A área circular representa o comportamento isotrópico sob ventos fracos, enquanto a forma alongada demonstra a predominância direcional em ventos mais intensos.

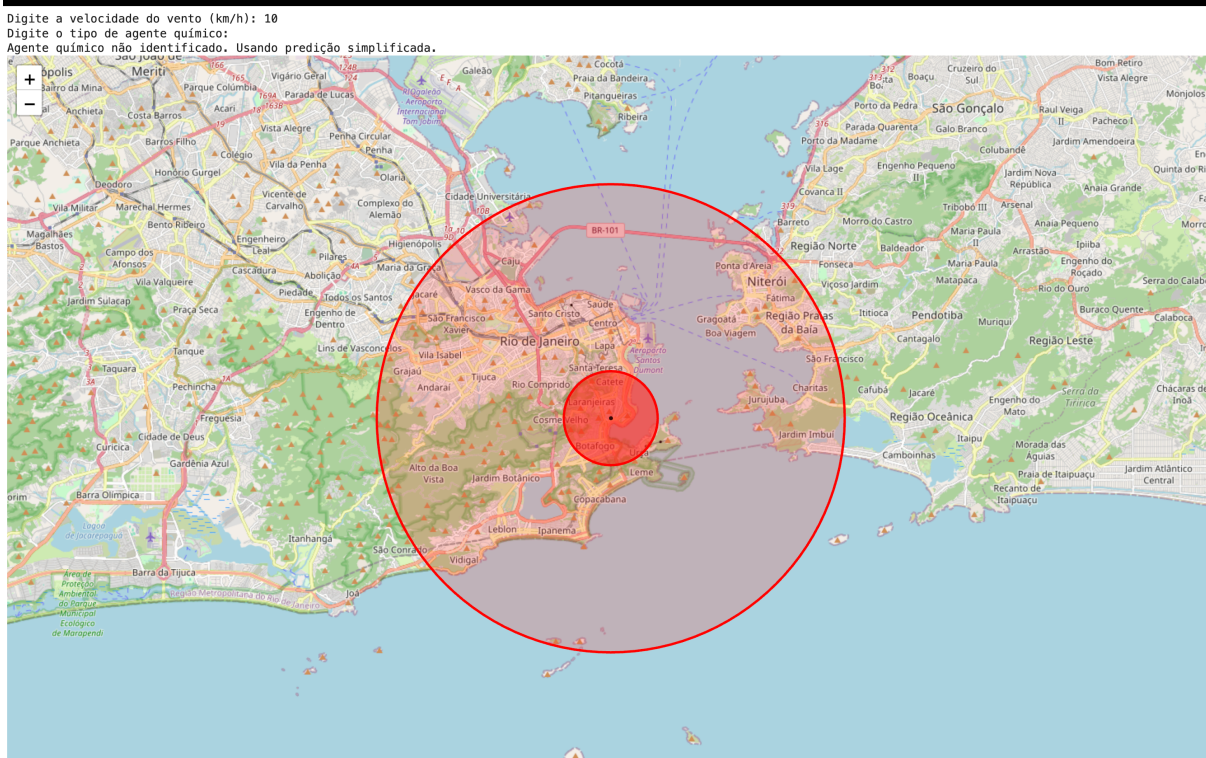


Figura 1: Predição simplificada e velocidade do vento ≤ 10 km/h

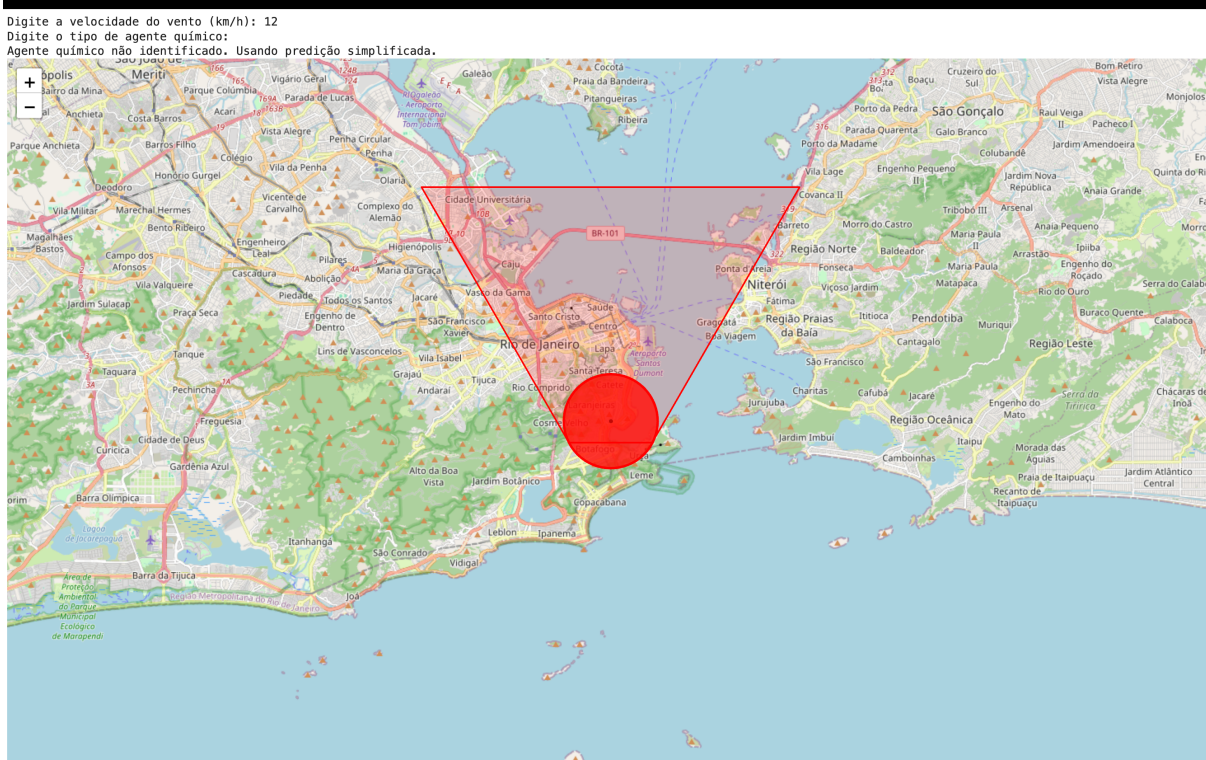


Figura 2: Predição simplificada e velocidade do vento > 10 km/h

5.2 Predição para Agentes Não Persistentes

Para agentes não persistentes, o modelo de predição considera não apenas a velocidade e direção do vento, mas também a estabilidade atmosférica do ar e o meio de lançamento. Isso permite estimar a dispersão do agente com maior precisão em função de variáveis meteorológicas críticas.

O sistema foi testado em quatro cenários representativos:

a) Velocidade do vento ≤ 10 km/h: nestes casos, a dispersão mantém-se predominantemente radial, com área de risco limitada em torno da fonte. Como mostrado na Figura 3, a área de risco apresenta formato aproximadamente circular, centrado na fonte.

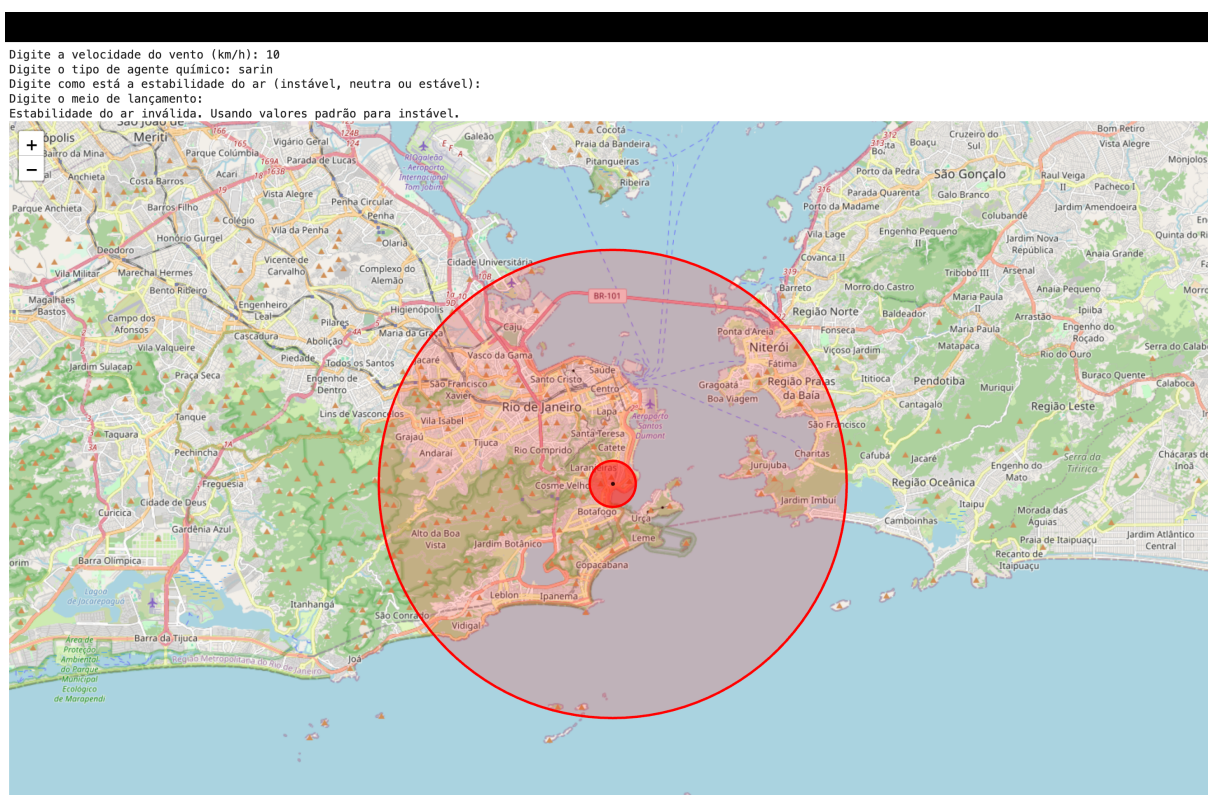


Figura 3: Agente não persistente e velocidade do vento ≤ 10 km/h

b) Velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar instável: A instabilidade do ar aumenta a turbulência e a dispersão lateral, ampliando a área potencialmente afetada. A dispersão resultante é mostrada na Figura 4, evidenciando maior extensão lateral.

c) Velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar neutra: A dispersão apresenta características intermediárias, com alongamento na direção do vento e moderada difusão lateral. A Figura 5 apresenta este cenário, mostrando um polígono de risco mais uniforme em relação aos casos instáveis.

Digite a velocidade do vento (km/h): 12

Digite o tipo de agente químico: sarin

Digite como está a estabilidade do ar (instável, neutra ou estável): instável

Digite o meio de lançamento:

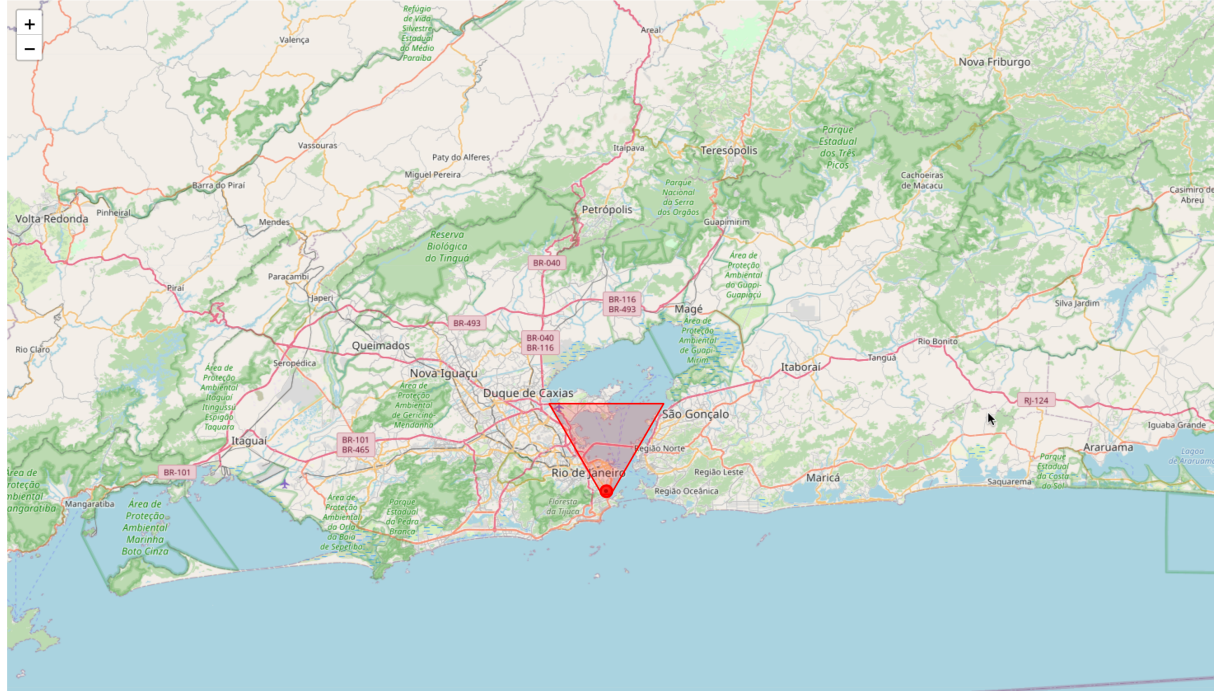


Figura 4: Agente não persistente, velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar instável

Digite a velocidade do vento (km/h): 12

Digite o tipo de agente químico: sarin

Digite como está a estabilidade do ar (instável, neutra ou estável): neutra

Digite o meio de lançamento:

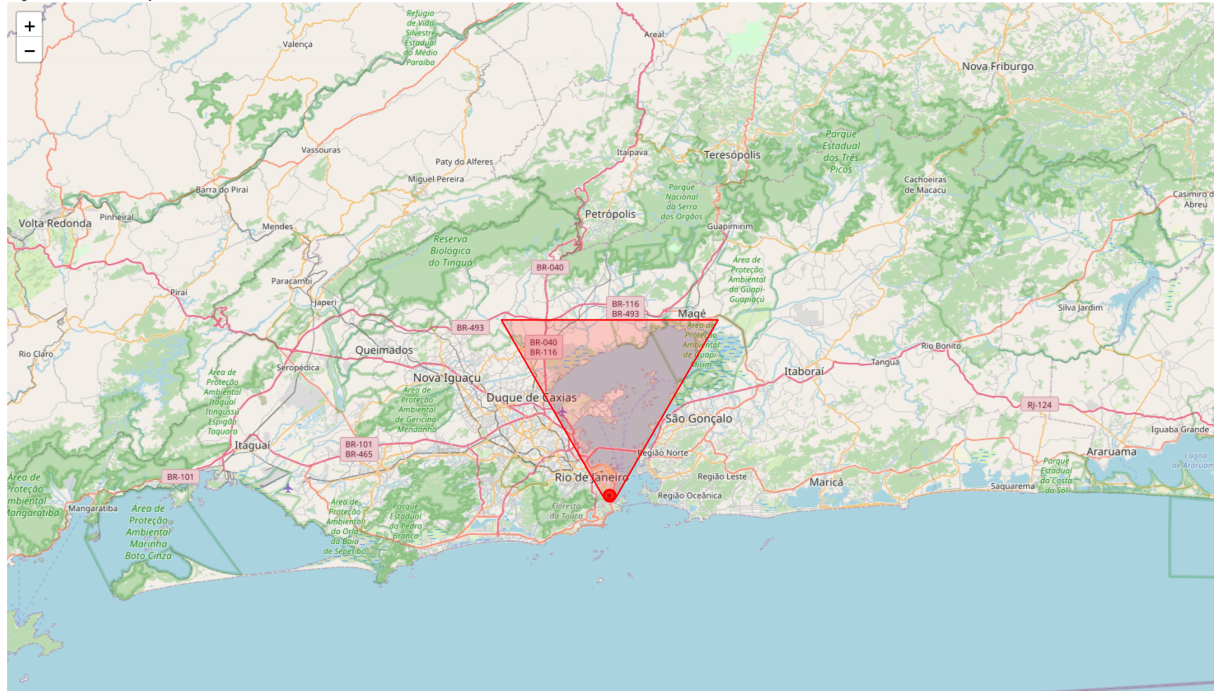


Figura 5: Agente não persistente, velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar neutra

d) Velocidade do vento > 10 km/h e ar estável: O vento mais intenso alonga a área de risco, mas a estabilidade do ar estável reduz a turbulência, mantendo a dispersão relativamente concentrada ao longo da direção do vento. A Figura 6 ilustra a forma alongada do polígono de risco.

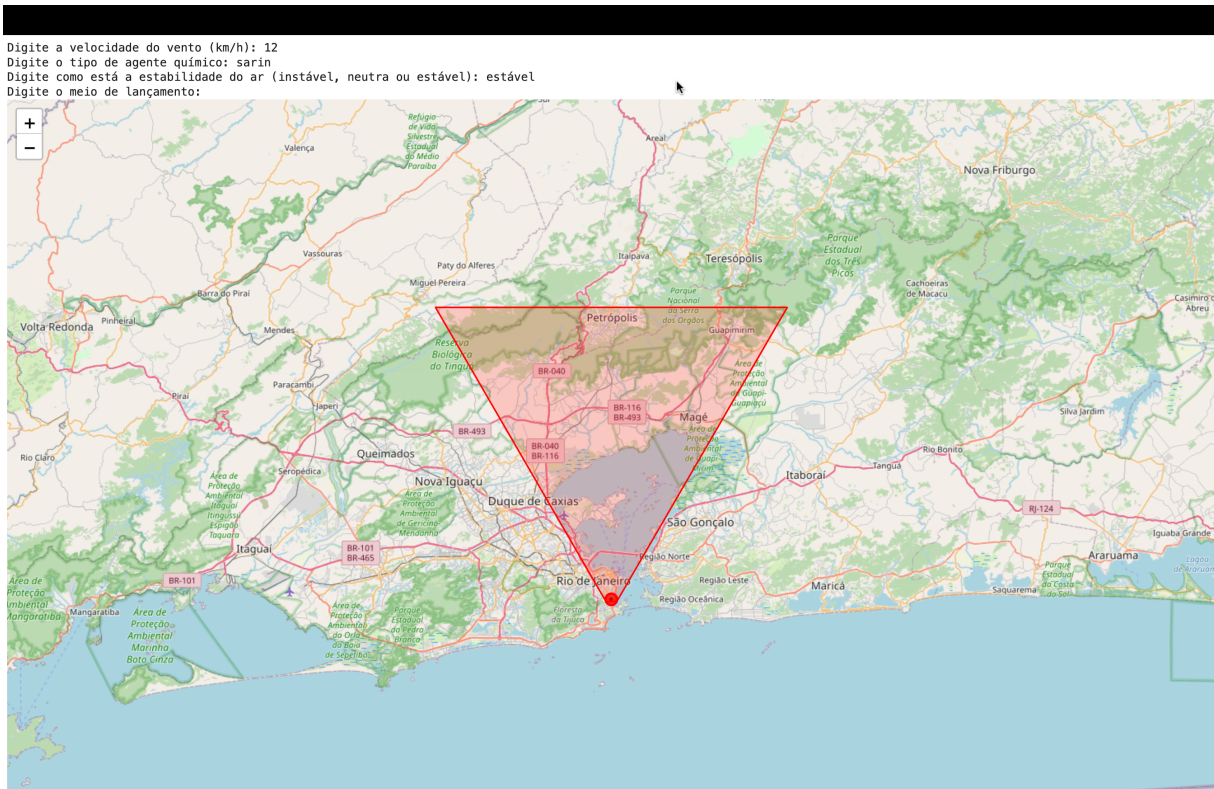


Figura 6: Agente não persistente, velocidade do vento > 10 km/h e estabilidade do ar estável

Os resultados indicam que, mesmo dentro da mesma categoria de agentes, as condições atmosféricas e a velocidade do vento têm impacto significativo na forma e extensão da área de risco, evidenciando a necessidade de modelagens diferenciadas para cada cenário operacional.

5.3 Predição para Agentes Persistentes

Para agentes persistentes, a dispersão é mais complexa, dependendo não apenas da velocidade e direção do vento, mas também do meio de lançamento e da persistência do agente, permitindo analisar cenários com maior risco de contaminação prolongada.

Os cenários avaliados incluem:

a) Detonação aérea

a.1) Velocidade do vento ≤ 10 km/h: a dispersão do agente permanece concentrada próximo à área de liberação, apresentando baixa alongação na direção do vento, resultando em um polígono quase circular. A Figura 7 ilustra a área afetada neste cenário.

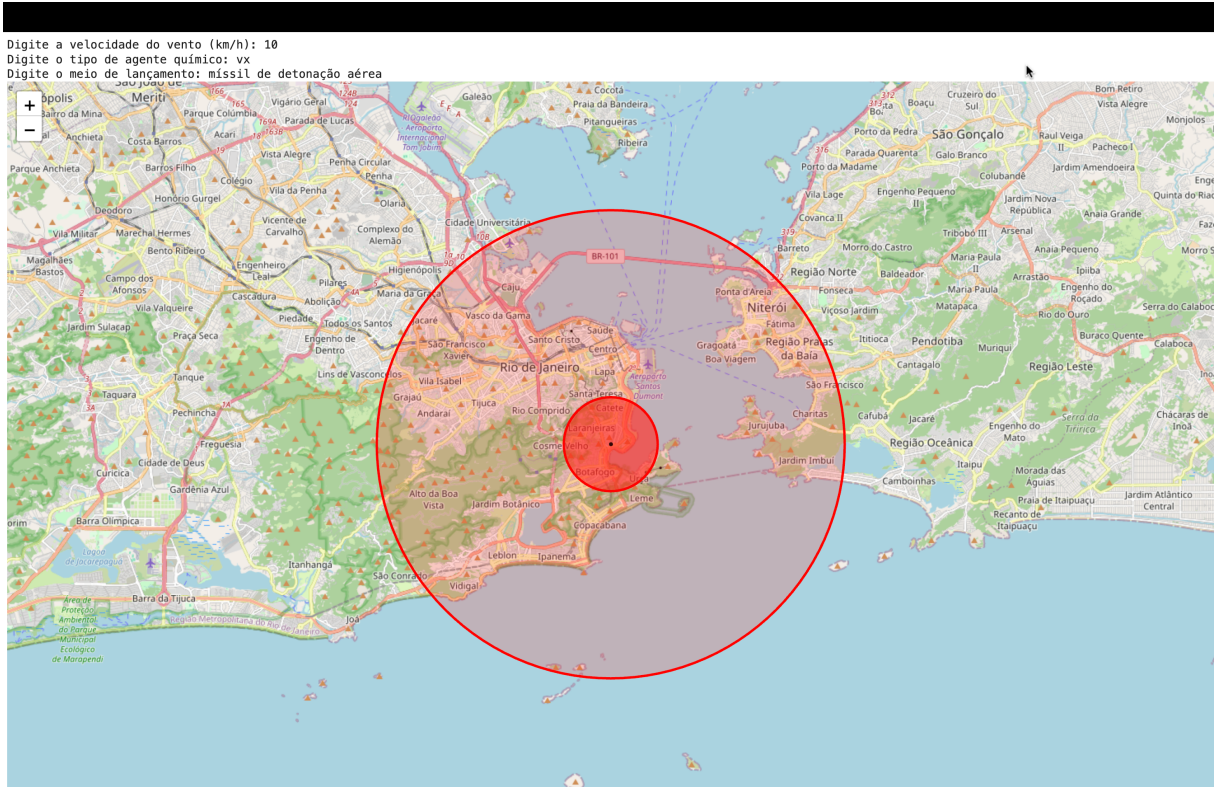


Figura 7: Agente persistente, detonação aérea e velocidade do vento ≤ 10 km/h

a.2) Velocidade do vento > 10 km/h: O vento direciona o agente, aumentando a alongação na direção do fluxo. A Figura 8 apresenta o polígono de risco correspondente.

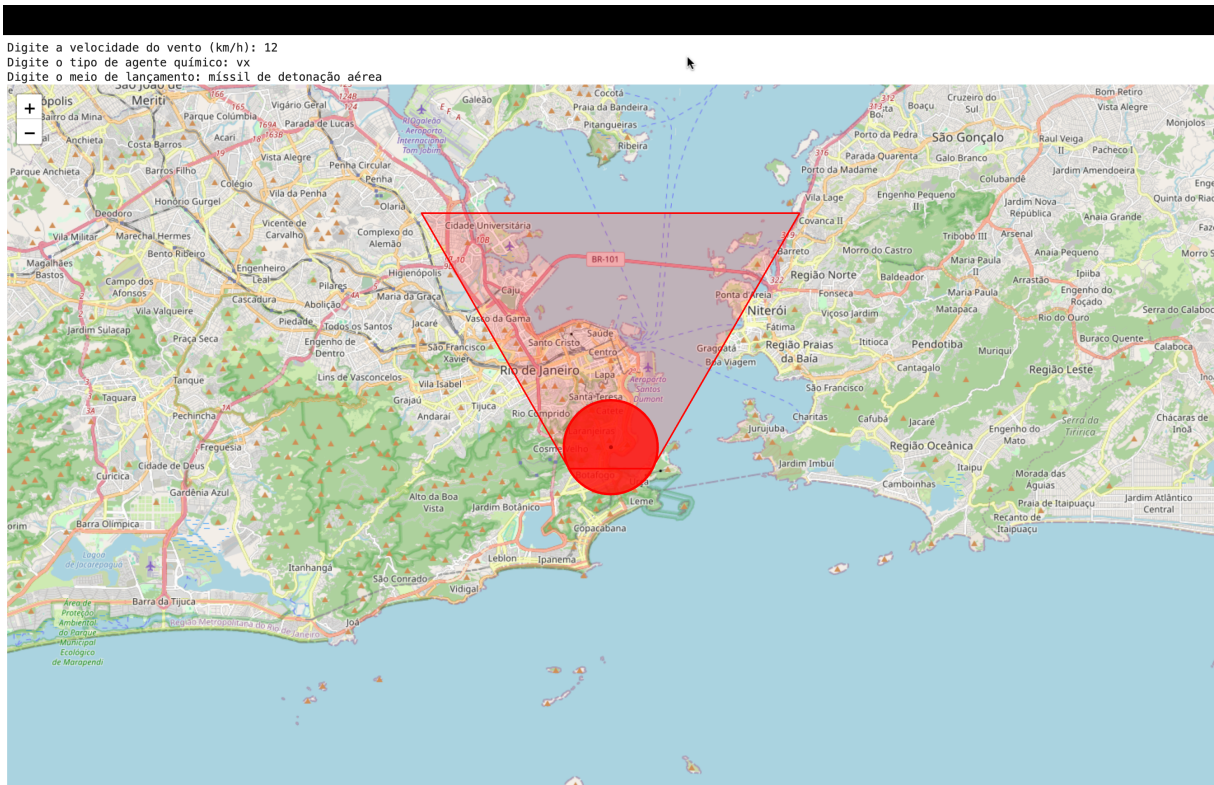


Figura 8: Agente persistente, detonação aérea e velocidade do vento > 10 km/h

b) Detonação por superfície

b.1) Velocidade do vento ≤ 10 km/h: a dispersão se mantém relativamente compacta em torno da fonte, conforme mostrado na Figura 9.

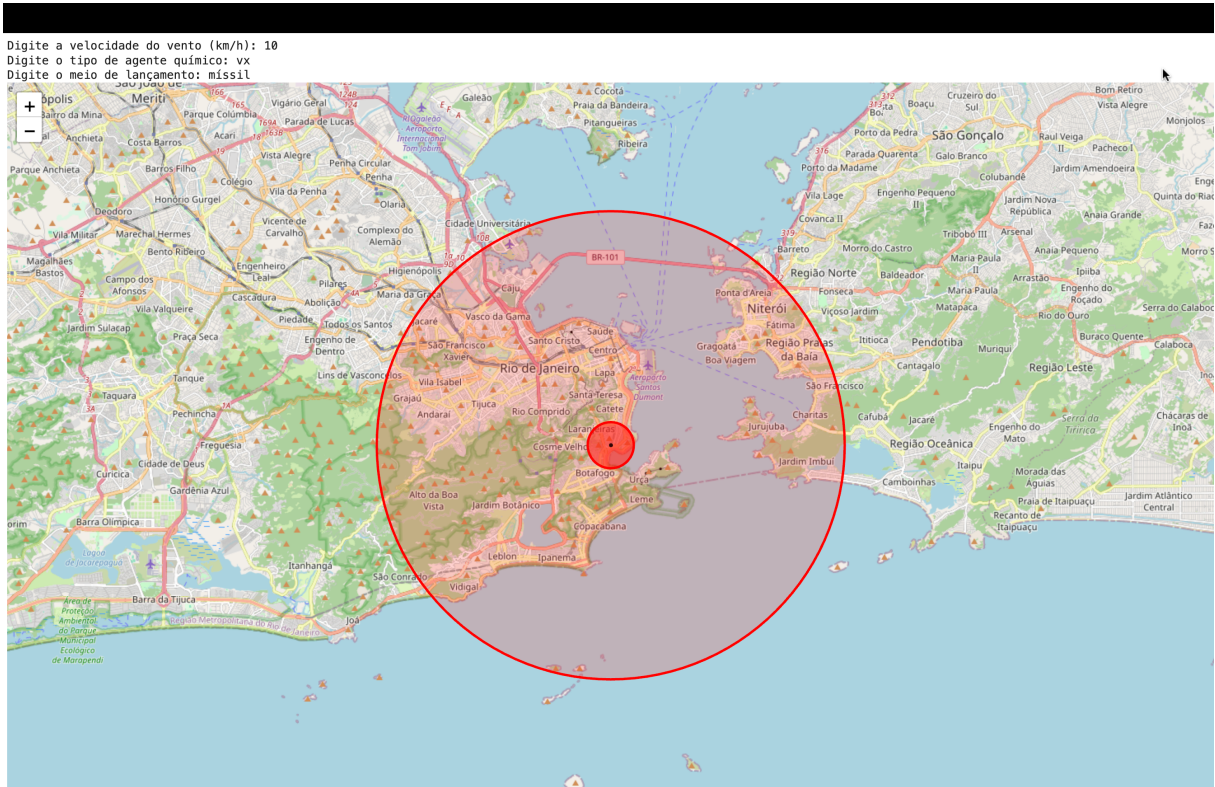


Figura 9: Agente persistente, detonação por superfície e velocidade do vento ≤ 10 km/h

b.2) Velocidade do vento > 10 km/h: o vento contribui para a alongação da área de risco, aumentando a exposição a distâncias maiores. O polígono resultante é exibido na Figura 10.

A principal diferença entre detonação aérea e por superfície está no raio de liberação: 2 km para aérea e 1 km para superfície. O vento influencia de forma similar ambos os tipos, alongando a dispersão na direção do fluxo.

c) Espargimento (geradores ou aerossóis)

O espargimento representa uma situação particular em que o agente é liberado ao longo de uma trajetória (por exemplo, por aeronaves ou veículos).

As coordenadas da trajetória utilizadas foram: source inicial (-22.941, -43.1798) e source final (-22.941, -43.3798).

c.1) Velocidade do vento ≤ 10 km/h: A dispersão acompanha o trajeto entre a fonte inicial e final, formando um polígono alongado. A Figura 11 mostra o cenário.

c.2) Velocidade do vento > 10 km/h: A área de risco se amplia e alonga significativamente na direção do vento, refletindo a combinação do espargimento com altas

velocidades. A Figura 12 ilustra este caso.

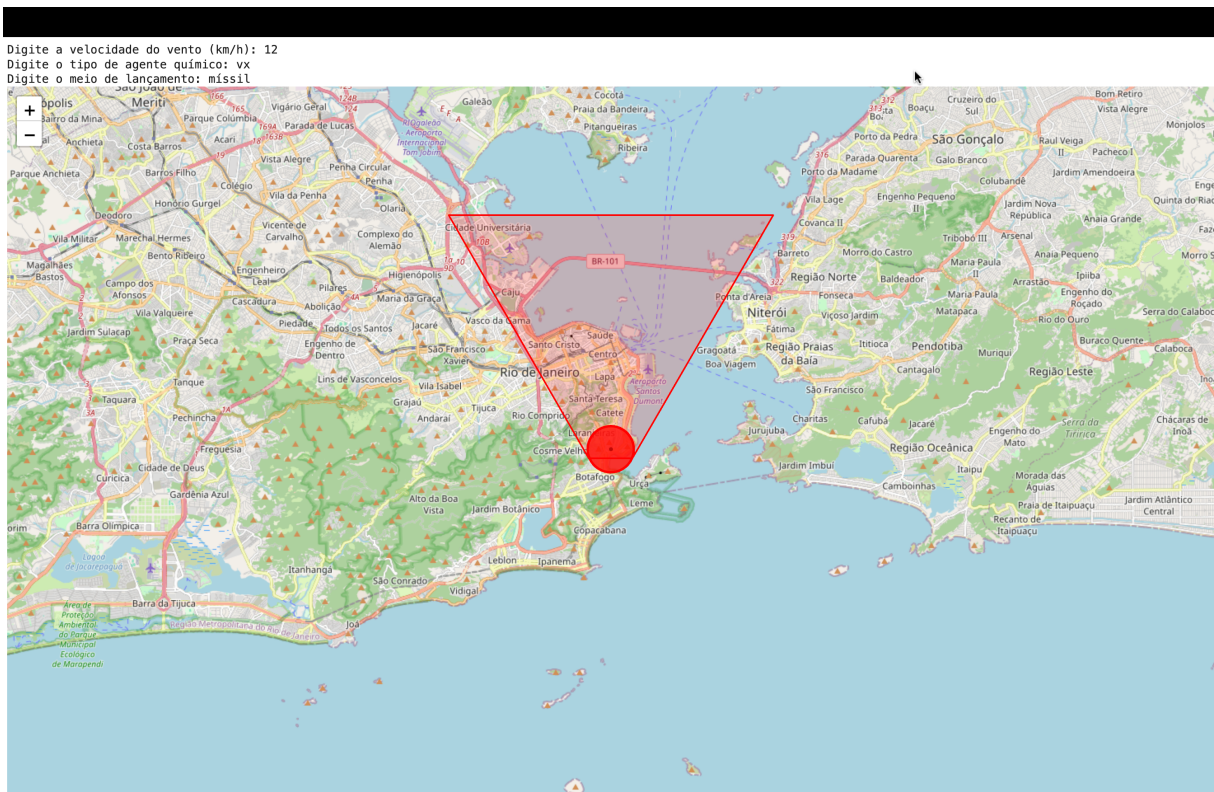


Figura 10: Agente persistente, detonação por superfície e velocidade do vento > 10 km/h

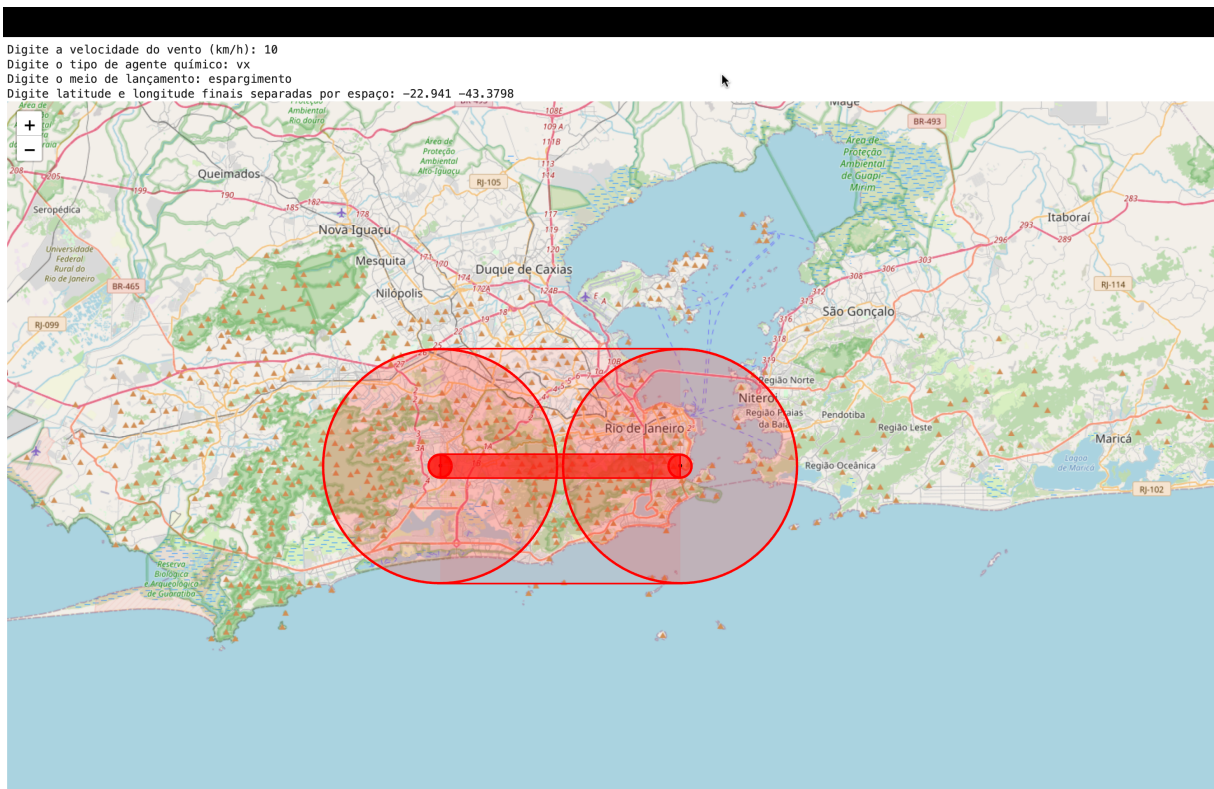


Figura 11: Agente persistente, espargimento e velocidade do vento ≤ 10 km/h

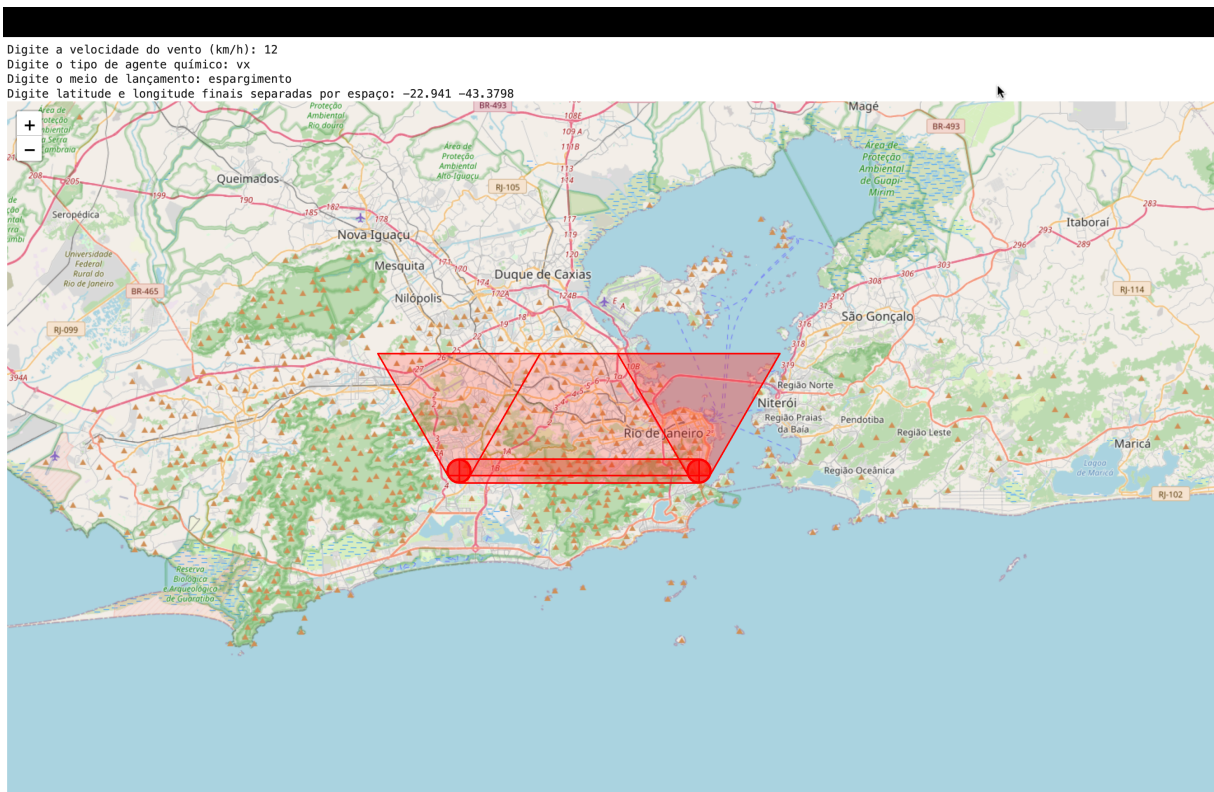


Figura 12: Agente persistente, espargimento e velocidade do vento > 10 km/h

Em síntese, os resultados apresentados neste capítulo evidenciam a influência determinante da velocidade do vento, da estabilidade atmosférica e do tipo de lançamento na dispersão de agentes químicos, tanto persistentes quanto não persistentes. As figuras demonstram como a área de risco se altera em cada cenário, variando de polígonos quase circulares em condições de vento fraco a áreas alongadas sob vento intenso. Adicionalmente, diferenças importantes entre detonação aérea, detonação por superfície e espargimento foram destacadas, especialmente no raio de liberação e na alongação do polígono de risco. Esses resultados fornecem uma base visual e analítica essencial para apoiar decisões táticas e medidas de mitigação em situações de exposição a agentes químicos.

5.4 Discussão dos Resultados

Os resultados demonstram que o sistema é capaz de reproduzir fielmente as geometrias de dispersão descritas no ATP-45, adaptando-se automaticamente às condições atmosféricas e ao meio de lançamento informado. A utilização de mapas interativos permite a análise visual dinâmica, possibilitando o ajuste de parâmetros e observação imediata das mudanças na forma da área de risco.

Além disso, o código modular facilita a integração com fontes de dados externas (como sensores NBQR) e a geração automática de alertas, tornando o sistema aplicável em contextos reais de defesa e resposta a emergências químicas.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o desenvolvimento e implementação de um sistema de análise preditiva para dispersão de agentes químicos, baseado nos princípios do ATP-45 da OTAN, adaptado para cenários urbanos e ambientes terrestres. O sistema integra diferentes módulos, incluindo a definição de agentes químicos, conversão geográfica, geração e visualização da área de risco, e predições detalhadas para agentes persistentes e não persistentes. A abordagem proposta permitiu avaliar de forma consistente a dispersão de agentes químicos considerando variáveis críticas, como velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, tipo de agente, e características do lançamento, sejam elas por detonação aérea, detonação por superfície ou espargimento.

Os resultados demonstraram que a predição simplificada é eficaz para fornecer uma estimativa inicial da área afetada, especialmente quando o agente químico ainda não é identificado. Cenários com velocidade do vento menor ou igual a 10 km/h mostraram dispersão mais concentrada, enquanto velocidades superiores a 10 km/h provocaram alongação na direção do vento, destacando a importância da influência meteorológica no planejamento de resposta a incidentes. Para agentes não persistentes, a consideração da estabilidade atmosférica (instável, neutra ou estável) permitiu ajustar os parâmetros de dispersão e o comprimento do polígono de risco, resultando em predições mais realistas e direcionadas às condições locais.

No caso de agentes persistentes, as diferenças entre detonação aérea e detonação por superfície foram evidenciadas pela área de liberação, com raios distintos (2 km para aérea e 1 km para superfície), impactando diretamente na forma do polígono de risco. Além disso, cenários de espargimento, com coordenadas finais específicas, mostraram a relevância da direção e da extensão da liberação, especialmente em velocidades de vento superiores a 10 km/h, destacando a necessidade de modelagem precisa em operações táticas ou em resposta a acidentes.

A implementação do sistema em ambiente de visualização geoespacial interativa, utilizando bibliotecas como Folium, possibilitou uma análise intuitiva das áreas de risco, permitindo identificar rapidamente zonas de maior exposição e facilitando a tomada de decisões estratégicas. O uso de polígonos, linhas de direção do vento e áreas circulares de liberação reforçou a interpretação visual dos resultados, tornando o sistema não apenas uma ferramenta de predição, mas também de suporte à decisão para oficiais de defesa NBQR.

Por fim, este estudo evidencia o potencial de integração entre modelagem matemática tradicional e inteligência artificial para previsão de dispersão de agentes químicos. Dessa forma, os trabalhos futuros devem explorar:

- a integração com redes de sensores em tempo real para alertas automáticos e atualização dinâmica das áreas de risco;

- a expansão para agentes biológicos e radiológicos, com modelagem específica de dispersão;
- a aplicação de inteligência artificial para otimização das previsões e ajuste de parâmetros conforme múltiplos cenários;
- estudos de sensibilidade para identificar variáveis críticas e aprimorar a acurácia das estimativas de risco.

Em síntese, o sistema desenvolvido apresenta robustez, flexibilidade e aplicabilidade prática, constituindo-se como uma ferramenta estratégica para planejamento e resposta a incidentes NBQR, com potencial de evolução contínua e integração em operações de defesa e segurança civil.

Além disso, o sistema desenvolvido está disponível online para testes e demonstração em <https://nbqr.onrender.com/>, permitindo que usuários explorem a predição de dispersão de agentes químicos de forma interativa e visual. A plataforma possibilita a inserção de diferentes parâmetros, como localização da fonte, velocidade e direção do vento, e tipo de agente químico, consolidando o caráter prático e aplicável do trabalho.

7 REFERÊNCIAS

- [1] AKIMOVA, A. Software for CBRN monitoring in accordance with ATP45 standard. Theseus, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.theseus.fi/handle/10024/780845>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [2] BRASIL. Marinha do Brasil. Comando-Geral do Corpo de Fuzileiros Navais. CGCFN-10.3 – Manual de Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica. 1. ed. Rio de Janeiro: Comando-Geral do Corpo de Fuzileiros Navais, 2020.
- [3] GIOVANNINI, L. *et al.* Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: challenges and needs for improving air quality measurements and modeling. *Atmosphere*, Basel, v. 11, n. 6, p. 646, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11060646>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [4] MCLEAN, C. *et al.* Modeling and simulation of hazardous material releases for homeland security applications. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2011. Disponível em: <https://www.nist.gov/publications/modeling-and-simulation-hazardous-material-releases-homeland-security-applications>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [5] MENDIL, M. *et al.* Hazardous atmospheric dispersion in urban areas: a deep learning approach for emergency pollution forecast. *Environmental Modelling and Software*, v. 152, p. 105387, jun. 2022. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105387.
- [6] NATO. ATP-45: Warning and Reporting and Hazard Prediction of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Incidents (Operators Manual). Edition F, Version 1. Brussels: NATO Standardization Office, Feb. 2019.
- [7] PLATT, N.; JONES, L. Potential use of Transport and Dispersion model output to supplement Allied Tactical Publication-45 hazard area prediction templates. *International Journal of Environment and Pollution*, [S.l.], v. 48, n. 1/4, p. 30–38, 2012. Disponível em: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJEP.2012.049649>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [8] VALLE, M. *et al.* Predicting atmospheric dispersion of industrial chemicals using machine learning approaches. *IEEE Access*, v. 13, p. 47587–47604, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10925212/>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- [9] VENTURA, P.; DE MATTIA, S. Modelling & simulation in support of a comprehensive CBRN layer development. Roma: NATO Modelling & Simulation Centre of Excellence, 2023. Disponível em: <https://www.mscoe.org/document/modelling-simulation-in-support-of-a-comprehensive-cbrn-layer-development/>. Acesso em: 29 jul. 2025.